CURRICULUM ATTIVITÀ DIDATTICA E SCIENTIFICA

Dr. Ing. MICHELE MORICI

Novembre 2015

(Ultimo aggiornamento 30.11.2015)

INFORMAZIONI PERSONALI	
Nome	Michele Morici
Luogo e Data di nascita	Fabriano (Ancona), 10 febbraio 1981
Indirizzo	
Telefono Mobile	
Telefono Fisso	
e-mail	
POSIZIONE ATTUALE	-
ISTRUZIONE E FORMAZIONE	
2015	In data 23/07/2015 supera l'esame di idoneità di Tirocinio Formativo Attivo (T.F.A.) in COSTRUZIONI, TECNOLOGIA DELLE COSTRUZIONI E DISEGNO TECNICO (A016 - COSTRUZIONI, TECNOLOGIA DELLE COSTRUZIONI E DISEGNO TECNICO), riportando la votazione di 98/100 (novantotto su cento) e crediti complessivi 60, presso l'Università di Camerino.
2015	In data 17/06/2015 supera l'esame di idoneità relativo a "*La gestione tecnica dell'emergenza sismica rilievo del danno e valutazione dell'agibilità*" ed è iscritto nella sezione ReLUIS del Nucleo Tecnico di cui al DPCM 8 luglio 2014.
2014	In data 06/03/2014 consegue il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Materiali delle Acque e dei Terreni, presso l'università Politecnica delle Marche discutendo la tesi di dottorato dal titolo *"Dynamic Behaviour of Deep Foundations with Inclined Pile"* tutor Prof. Ing Giuseppe Scarpelli, Co-Tutor Ing. Fabrizio Gara.
2012	In data 12/03/2012 si iscrive all'Ordine degli Ingegneri della provincia di Ancona, assegnandogli il numero di anzianità 3607.
2010	Nel Dicembre del 2010 (seconda sessione 2010) è abilitato all'esercizio della professione di ingegnere nel settore Civile e Ambientale, Industriale dell'Informazione, con votazione complessiva di 231/240, conseguito presso l'Università Politecnica delle Marche. Nel novembre del 2010 supera il concorso per l'ammissione alla Scuola di Dottorato di Ricerca della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, in "Scienze dell'Ingegneria" - Curriculum: Ingegneria dei Materiali, delle Acque e dei Terreni - XII ciclo n.s. In data 22/07/2010 consegue la Laurea in Ingegneria Civile (ordinamento previgente D.M. 509/99) presso l'Università Politecnica delle Marche, con votazione 110/110 e lode, con una tesi di ricerca dal titolo: *"LA MODELLAZIONE DEL RILEVATO NELL' ANALISI DI INTERAZIONE DINAMICA TERRENO STRUTTURA DI PONTI ANCORATI ALLA SPALLA"* – Relatore Prof. Ing. Luigino Dezi.

2000-2010 | Frequenta il corso di laurea in ingegneria civile presso l'Università di Ancona includendo nel suo percorso di studio i seguenti esami e conseguendo le votazioni:

Insegnamento	*Voto*	*Data*
ANALISI MATEMATICA I	25/30	07/03/2001
COLLOQUIO LINGUA INGLESE	Idoneo	21/01/2010
FISICA GENERALE I	25/30	25/10/2001
GEOMETRIA	24/30	11/07/2001
ANALISI MATEMATICA II	26/30	09/07/2002
DISEGNO	29/30	10/07/2002
FISICA GENERALE II	27/30	13/02/2002
FONDAMENTI DI INFORMATICA	25/30	05/03/2002
MECCANICA RAZIONALE	24/30	11/03/2003
ARCHITETTURA TECNICA	27/30	20/05/2003
IDRAULICA	24/30	18/07/2003
SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	30/30	18/12/2003
SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI	27/30	25/02/2003
TOPOGRAFIA	30/30	28/01/2004
COSTRUZIONI DI STRADE,FERROVIE,AEROPORTI	26/30	20/07/2004
COSTRUZIONI IDRAULICHE	30/30	31/10/2008
GEOTECNICA	24/30	10/05/2005
PROGETTO DI STRADE, FERROVIE E AEROPORTI	29/30	17/05/2004
TECNICA DELLE COSTRUZIONI	30/30	20/07/2006
TEORIA DELLE STRUTTURE	30/30 + LODE	06/09/2005
COSTRUZIONI DI MATERIALI SCIOLTI	30/30 + LODE	25/05/2005
COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA	30/30 + LODE	16/04/2007
FONDAZIONI	30/30	24/10/2005
INFRASTRUTTURE VIARIE URBANE E METROPOLITANE	30/30	22/12/2008
LABORATORIO DI TECNICA DELLE COSTRUZIONI	30/30	16/07/2009
PROGETTO DI STRUTTURE	30/30	12/12/2006
RIABILITAZIONE STRUTTURALE	30/30	09/03/2009
STRUTTURE SPECIALI	30/30 + LODE	14/03/2008
TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI	30/30	09/01/2006
TEORIA E PROGETTO DEI PONTI	30/30	24/09/2009
TEORIA E PROGETTO DELLE COSTRUZIONI IN ACCIAIO		

2000 | Nel luglio del 2000 consegue il Diploma di Maturità Tecnica di GEOMETRA (progetto 5) presso il l'Istituto Tecnico Statale e per Geometri "*A. Morea*" di Fabriano con la votazione di 100/100.

FORMAZIONE POST LAUREA

2015 | Partecipa al Corso di Perfezionamento Avanzato coordinato dal prof. Alberto Burghignoli (Università di Roma – La Sapienza): "Interazione Terreno-Struttura" – dal 7 all'8 ottobre 2015 organizzato presso il CISM (Centre International des Sciences Mécaniques - International Centre for Mechanical Sciences) Udine

2013 | Partecipa agli incontri di lavoro organizzati dal dipartimento di protezione civile in collaborazione con Reluis su: *"La gestione tecnica dell'emergenza sismica rilievo del danno e valutazione dell'agibilità"* – 15/16 aprile 2013 Roma, e 11 giugno 2013 Bologna.

2012	Partecipa al corso breve in: *"Progettazione e Valutazione di Capannoni Industriali ed Edifici Prefabbricati Pluripiano in Zona Sismica"*, presso l'EUCENTRE, ROSE School (European School for Advanced Studies in Earthquake Engineering). Pavia 26-27 Ottobre 2012.
2011	Partecipa alla giornata di studio: *"Controlli di Accettazione dei Materiali da Costruzione, Indagini non Distruttive e Monitoraggio delle Strutture Civili"* organizzato presso l'Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura – 3 dicembre 2011.
	Partecipa al corso avanzato (Advanced Professional Training) su: *"ANALYSIS OF CREEP AND SHRINKAGE EFFECTS IN CONCRETE STRUCTURES"*, organizzato presso il CISM (Centre International des Sciences Mécaniques - International Centre for Mechanical Sciences) di Udine – 23-27 Maggio 2011.
dal 2010 al 2013	Fin dallo svolgimento della tesi di laurea, ha partecipato ai seminari organizzati nell'ambito del corso di dottorato in Strutture e Infrastrutture.
ATTIVITÀ DIDATTICA	
A.A.2014/2015	Dal 01/10/2014 al 30/09/2015 - Docenza a contratto per il corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile, presso l'Università degli Studi di San Marino, per l'insegnamento "*Geotecnica*".
A.A.2014/2015	Svolgimento di attività didattica di supporto ai corsi universitari di *"Tecnica delle Costruzioni"* tenuto dal Prof. Ing. Luigino Dezi, ed *"Ingegneria Sismica"* tenuto dall'Ing. Fabrizio Gara, attraverso lezioni teoriche e revisioni degli elaborati progettuali previsti nei corsi.
A.A.2013/2014	Dal 01/10/2013 al 30/09/2014 - Docenza a contratto per il corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, presso l'Università degli Studi di San Marino, per l'insegnamento "*Progetti di Strutture*".
A.A.2013/2014	Svolgimento di attività didattica di supporto ai corsi universitari di *"Tecnica delle Costruzioni"* tenuto dal Prof. Ing. Luigino Dezi, ed *"Ingegneria Sismica"* tenuto dall'Ing. Fabrizio Gara, attraverso lezioni teoriche e revisioni degli elaborati progettuali previsti nei corsi.
A.A.2012/2013 A.A.2011/2012 A.A.2010/2011	Durante gli anni di dottorato, compatibilmente con quanto prescritto dal regolamento del dottorato di ricerca, presso il dipartimento D.I.C.E.A. (sezione strutture) dell'Università Politecnica delle Marche (Facoltà di Ingegneria), collabora ai corsi universitari di *"Tecnica delle Costruzioni"* tenuto dal Prof. Ing. Luigino Dezi, ed *"Ingegneria Sismica"* tenuto dall'Ing. Fabrizio Gara, attraverso lezioni teoriche ed alle revisioni degli elaborati progettuali. Affianca inoltre il Prof. Ing. Luigino Dezi nell'attività di assistenza allo svolgimento di tesi di laurea.
ATTIVITA' SEMINARIALE	Partecipa in qualità di relatore su invito a workshop/seminari di seguito riportati:
2015	Workshop: Liquefazione, Risposta Sismica Locale e Interazione Dinamica Terreno-Fondazione-Struttura tenuto presso l'Università degli Studi di San Marino – RSM il 13/11/2015 presentando il lavoro: "Comportamento sismico di pile da ponte fondate su pali inclinati".

2014	Seminario presso l'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" – presentando l'intervento dal titolo: "Pali soggetti a forze orizzontali" tenuto in data 03/12/2014. Seminario presso l'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" – presentando l'intervento dal titolo: "Progetto di fondazioni superficiali e profonde secondo le NTC2008" tenuto in data 10/12/2014.
2013	Seminario presso l'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" – presentando l'intervento dal titolo: "Pali soggetti a forze orizzontali" tenuto in data 04/12/2013. Seminario presso l'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" – presentando l'intervento dal titolo: "Aspetti normativi: fondazioni superficiali e profonde" tenuto in data 11/12/2013.
RELAZIONI A CONFERENZE	Partecipa in qualità di relatore alle seguenti conferenze nazionali ed internazionali:
2013	*"International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering: From Case History to Practice - ICEGE 2013"* - Istanbul (Turchia) 17-19 Giugno 2013, e presentando il lavoro: Carbonari S., Morici M., Dezi F. *Dynamic Analysis of Battered Pile.* **[IC03]** XV convegno ANIDIS: "*ANIDIS 2013: L'ingegneria Sismica in Italia*" – Padova 30 giugno-04 Luglio 2013, e presentando il lavoro: Morici M., Carbonari S., Dezi F. *A Model for the Dynamic Analysis of Inclined Pile Groups.* **[NC03]**
PARTECIPAZIONE A PROGETTI DI RICERCA	Partecipa ad attività connesse ai progetti di ricerca di seguito riportati:
2015	Partecipa al Programma di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale finanziato da ARCUS SpA, convenzionato con il Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo (MIBACT), convenzionato con ReLUIS – Consorzio della rete dei laboratori universitari di ingegneria sismica, dal titolo "*Verifica della sicurezza sismica dei musei statali. Applicazione Ordinanza P.C.M. 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva P.C.M. 12.10.2007*" (anno 2013). Unità di Ricerca dell'Università Politecnica delle Marche (responsabile scientifico Prof. L. Dezi, referente tecnico Dott. Ing. Fabrizio Gara): verifica della sicurezza sismica del Museo Archeologico Nazionale delle Marche (Ancona) e della Rocca Roveresca (Senigallia).
2012	PRIN 2008 - Effetto del non sincronismo inclusa la risposta sismica locale sulla sicurezza dei ponti; coordinatore nazionale: Prof. Ing. Camillo Nuti.

ATTIVITÀ DI RICERCA	
2010 ad oggi	Sin dalla tesi di laurea, si occupa dei fenomeni di interazione Terreno Struttura; Da Novembre del 2010 svolge attività di ricerca presso il D.I.C.E.A. dell'Università Politecnica delle Marche. L'attività scientifica può essere suddivisa nei seguenti filoni di ricerca: **Interazione dinamica terreno-fondazione-struttura;** **Modellazione numerica agli elementi finiti;** **Analisi non lineare di strutture;** Per maggiori dettagli sull'attività di ricerca consultare l'allegato A in appendice.
COLLABORAZIONI PROGETTUALI	
2015	*Attività di supporto alla verifica sismica del Museo Archeologico Nazionale delle Marche, in Ancona"* 06/12/2014 - 18/02/2015 - Contratto per prestazione d'opera occasionale con il dipartimento DICEA - Università Politecnica delle Marche.
CORRELATORE TESI DI LAUREA	E' correlatore delle seguenti tesi di laurea:
2015	A.A. 2014/15: Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Università degli studi di Modena e Reggio Emilia: Titolo Tesi: *L'effetto dell'approfondimento della zattera nella risposta dinamica di fondazioni profonde.* Laureanda: Meglioli Giulia Relatore: Prof.ssa Francesca Dezi

Sassoferrato 30/11/2015

Dr. Ing. Michele Morici

ELENCO DELLE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE

Tesi di Dottorato

[TD] Morici M. (2013). *Dynamic Behaviour of Deep Foundations with Inclined Pile*. PhD Thesis, Marche Polytechnic University.

Pubblicazioni su riviste internazionali

[IJ01] Dezi F., Morici M., Carbonari S., Leoni G. (2012). Higher Order Model for the Seismic Response of Bridge Embankments. ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering*** - Vol. 43, December 2012, Pages 186–201 http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.027).

[IJ02] Dezi F., Carbonari S., Morici M. (2015). A Numerical Model for the Dynamic Analysis of Inclined Pile Groups. ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics*** – August 2015 – Published on line, doi:10.1002/eqe.2615. Codice SCOPUS: 2-s2.0-84939499001. ISSN: 00988847.

[IJ03] Carbonari S., Morici M., Dezi F., Leoni G. (2015). Analytical Evaluation of Impedance and Kinematic Response of Inclined Piles. ***Engineering Structures*** – *Article submitted and accepted with minor revision.*

Pubblicazioni su atti di congressi internazionali

[IC01] Dezi F., Morici M., Carbonari S. and Leoni G. (2011). 2D higher order model for the dynamic analysis of bridge embankments. *Proceedings of the* ***8th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN2011)*** – Leuven, Belgium, 4-6 July 2011.

[IC02] Carbonari S., Morici M., Dezi F., Leoni G., Nuti C., Silvestri F., Tropeano G., Vanzi I. (2012). Seismic Response of Viaducts Accounting for Soil-Structure Interaction. *Proceedings of the* ***15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*** – Lisbona 24-28 settembre 2012.

[IC03] Carbonari S., Morici M., Dezi F. (2013). Dynamic Analysis of Battered Pile. *Proceedings of* ***International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering: From Case History to Practice*** **(ICEGE 2013)** – Istanbul 17-19 June, 2013.

[IC04] Carbonari S., Morici M., Dezi F., Leoni G. (2013). Seismic Soil-Structure-Interaction of Multi-Span Bridges With Continuous Deck. *Proceedings of* ***International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering: From Case History to Practice*** **(ICEGE 2013)** – Istanbul 17-19 June, 2013.

[IC05] Leoni G., Carbonari S., Morici M., Tassotti L., Zona A., Varelis G. E., Dall'Asta A. (2014). Design procedure and analysis of innovative steel frames with reinforced concrete infill walls. *Proceedings of* ***EUROSTEEL 2014***, September 10-12, 2014, Naples, Italy.

[IC06] Morici M., Carbonari S., Dezi F. Leoni G. (2014). A 3D numerical model for the dynamic analysis of pile groups with inclined piles. *Proceedings of the* ***9th International Conference on Structural Dynamics, (EURODYN 2014)*** – Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014.

[IC07] Leoni G., Carbonari S., Morici M., Tassotti L., Zona A., Varelis G.E. and Dall'Asta A. (2014). Nonlinear Seismic Analysis of Innovative Steel Frames with Infill Walls.

Proceedings of the ***Twelfth International Conference on Computational Structures Technology, B.H.V.*** (CST 2014), 2-5 September 2014, Naples, Italy.

[IC08] Morici M., Carbonari S., Dezi F., Gara F., Leoni G. (2014). Seismic response of bridge piers founded on inclined pile groups. *Proceedings of the* ***2ECEES - Second European Conference on Earthquake Geotechnical Engineering and Seismology***, 25-29 August 2014, Istanbul, Turkey.

[IC09] Capatti M. C., Carbonari S., Dezi F., Leoni G., Morici M., Silvestri F., Tropeano G. (2015). Effects of non-synchronous ground motion induced by site conditions on the seismic response of multi-span viaducts. *Proceedings of the* ***6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering***, 1-4 November 2015 Christchurch, New Zealand.

Pubblicazioni su atti di congressi nazionali

[NC01] Dezi F., Morici M., Carbonari S., and Leoni G. (2011). Dynamic Stiffness and Kinematic Response of Bridge Embankments. *Proceedings of the* ***14° Convegno Nazionale – L'ingegneria sismica in Italia*** – ANIDIS 2011, Bari 18-22 Settembre 2011.

[NC02] Carbonari S., Morici M., Dezi F., and Leoni G. (2013). Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Multi-Span Viaducts. *Proceedings of the* ***15° Convegno Nazionale – L'ingegneria sismica in Italia*** – ANIDIS 2013 – Padova 30 giugno-4 luglio 2013.

[NC03] Morici M., Carbonari S., Dezi F. (2013). A Model for the Dynamic Analysis of Inclined Pile Groups. *Proceedings of the* ***15° Convegno Nazionale – L'ingegneria sismica in Italia*** – ANIDIS 2013 – Padova 30 giugno-4 luglio 2013.

[NC04] Morici M., Carbonari S., Dezi F., Gara F., Leoni G. (2014). Risposta Sismica di Pile Fondate su Gruppi di Pali Inclinati. *Proceedings of* ***Giornate AICAP 2014 – 27° Convegno Nazionale*** – Bergamo 22-24 Maggio 2014.

[NC05] Dezi F., Morici M., Carbonari S. (2014). Dynamic Analisys of Inclined Piles. *Proceedings of* ***XXV Convegno Nazionale di Geotecnica (XXVCNG)*** – Baveno 4-6 Giugno 2014.

[NC06] Dezi F., Morici M., Carbonari S. (2014). Risposta Sismica di Pile da Ponte Fondate su Gruppi di Pali Inclinati. *Proceedings of* ***Incontro Annuale Ricercatori di Geotecnica (IARG)*** – Chieti 14-16 Luglio 2014.

[NC07] Capatti M. C., Carbonari S., Dezi F., Leoni G., Morici M., Silvestri F., Tropeano G. (2015). Simultaneous Effect of Spatial Variability of Ground Motion due to Site Conditions and SSI on The Seismic Response of Multi-Span Viaducts. *Proceedings of* ***Incontro Annuale Ricercatori di Geotecnica (IARG)*** – Cagliari 24-26 Giugno 2015.

[NC08] Carbonari S., Morici M., Gara F., Dezi F., Leoni G. (2015). Impedances of Inclined Piles: an Analytical Solution. *Proceedings of the* ***16° Convegno Nazionale – L'ingegneria sismica in Italia*** – ANIDIS 2015 – L'Aquila 13-17 settembre 2015.

[NC09] Capatti M. C., Carbonari S., Dezi F., Leoni G., Morici M., Silvestri F., Tropeano G. (2015). Seismic Response of Bridges Accounting for Soil-Structure Interaction effects and the Non-Synchronous Ground Motion due to 1D and 2D site analysis. *Proceedings of the* ***16° Convegno Nazionale – L'ingegneria sismica in Italia*** – ANIDIS 2015 – L'Aquila 13-17 settembre 2015.

Sassoferrato 30/11/2015

Dr. Ing. Michele Morici

ALLEGATO A: DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA SVILUPPATA

Inquadramento della ricerca

L'attività scientifica riferita al quinquennio 2011-2015, si focalizza principalmente nel filone di ricerca sulla interazione dinamica terreno-fondazione struttura. A questa sono da aggiungere le occasioni di studio e approfondimenti di alcuni aspetti e temi, afferenti al settore della tecnica delle costruzioni, scaturite da collaborazioni con gruppi di ricerca o da convenzioni, concretizzate in lavori di rilievo scientifico.

Interazione Dinamica Terreno-Fondazione-Struttura

Evidenze sperimentali ed analisi condotte in seguito al verificarsi di eventi sismici hanno ormai accertato l'importanza dell'interazione terreno-struttura nella valutazione del comportamento sismico delle strutture. Nella letteratura tecnica sono sostanzialmente due gli approcci adottabili per lo studio di questi fenomeni: (i) un approccio diretto del problema che ricorre alla modellazione del sistema terreno-fondazione-struttura nella sua globalità sfruttando metodi di calcolo agli elementi finiti (FEM) o agli elementi finiti in associazione a elementi di contorno (BEM) e (ii) un approccio per sottostrutture, basato sulla tecnica di decomposizione dei domini, per mezzo del quale il sistema terreno-fondazione e la sovrastruttura sono analizzati separatamente introducendo idonee impedenze all'interfaccia (Figura 1).

I metodi basati su un approccio per sottostrutture sono caratterizzati da un'elevata versatilità che deriva dalla possibilità di studiare ciascun sottodominio con metodi di analisi differenti, attraverso l'introduzione di opportune impedenze dinamiche in grado di simulare l'interazione tra i sottodomini. In questo contesto, l'analisi di interazione terreno-struttura si divide classicamente in analisi cinematica e analisi inerziale. L'interazione cinematica si esplica nel sottodominio rappresentato dal terreno e dalla fondazione. L'interazione inerziale consiste invece nello studiare la sovrastruttura vincolata a terra con supporti cedevoli caratterizzati dalle impedenze dinamiche del sistema terreno-fondazione e soggetta al moto di fondazione determinato nell'analisi di interazione cinematica. Quest'ultima è responsabile delle sollecitazioni sulla sovrastruttura e di una parte delle sollecitazioni in fondazione.

Con specifico riferimento alle fondazioni su pali, l'interazione cinematica, legata ai fenomeni di propagazione ondosa nel terreno, determina non solo la modifica del moto di fondazione rispetto al moto di free-field, ma anche l'insorgere di sollecitazioni lungo i pali. Lo studio di interazione cinematica fornisce sia il moto di fondazione trasmesso alla sovrastruttura che le impedenze dinamiche del sistema terreno-fondazione, entrambi necessari all'esecuzione dell'analisi di interazione inerziale.

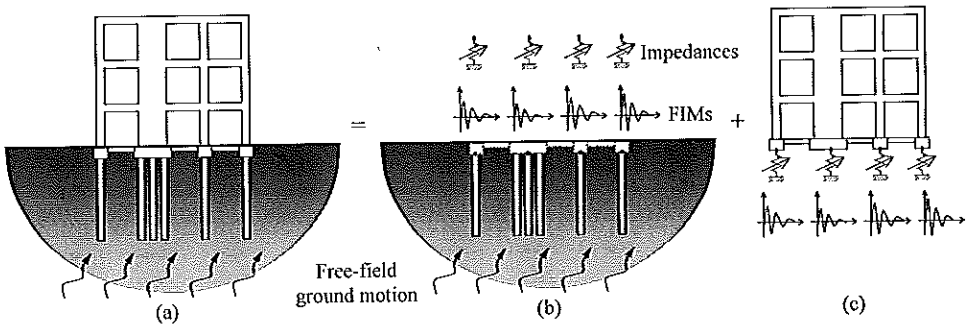

Figura 1: Approccio per sottostrutture: (a) sistema completo terreno-fondazione struttura; (b) sistema terreno-fondazione e (c) sovrastruttura

In questo contesto, l'attività di ricerca sviluppata nel quinquennio in oggetto è stata caratterizzata dai seguenti obiettivi:

1. modellazione dell'interazione terreno-fondazione, ed in particolare palo-terreno-palo, per lo sviluppo delle analisi di interazione cinematica;
2. studio degli effetti dell'interazione terreno-fondazione-struttura nella risposta sismica delle strutture.

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica dell'attività svolta con i precedenti fini.

Contributi originali

Modellazione dell'interazione terreno-fondazione per fondazioni su pali

Relativamente al caso di fondazioni su pali, sia ad asse verticale che inclinato, l'interazione cinematica, causata dalla propagazione delle onde sismiche nel terreno, induce delle sollecitazioni lungo i pali che, dipendentemente dal profilo stratigrafico del terreno, possono assumere la stessa importanza di quelle indotte in testa dall'interazione inerziale con la sovrastruttura. Sebbene alcuni ricercatori abbiano proposto metodi agli elementi finiti e agli elementi di contorno per lo studio della risposta dinamica di fondazioni su pali, per ragioni legate alla sua versatilità nel tener conto di condizioni al contorno anche complicate, viene comunemente usato il modello di trave su suolo elastico alla Winkler. Al fine di studiare la risposta dinamica di pali singoli e in gruppo, è stata messa a punto una procedura numerica agli elementi finiti [IJ02], per la valutazione dell'interazione cinematica terreno-palo in terreni orizzontalmente stratificati. L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze ed è valida per palificate con geometria generica. Il palo, avente una generica inclinazione rispetto alla verticale, è modellato con elementi finiti di tipo trave deformabili flessionalmente ed assialmente; il terreno viene schematizzato come un semispazio costituito da strati orizzontali indefiniti di terreno di spessore infinitesimo tra loro indipendenti (Figura 2a). Sia i pali che il terreno hanno un comportamento lineare. Nel caso di palificate l'interazione palo-terreno-palo è colta utilizzando funzioni di Green elastodinamiche che consentono di esprimere le mutue interazioni tra i pali che compongono il gruppo (Figura 2b). Lo smorzamento isteretico del terreno e quello per radiazione, dovuto alla propagazione di onde nel terreno, sono inclusi nella modellazione. Il campo di spostamenti di input può essere rappresentato da semplici eccitazioni armoniche o, più realisticamente, da accelerogrammi; in quest'ultimo caso le storie degli spostamenti devono essere determinate per mezzo di analisi di risposta locale di tipo monodimensionale o spaziale dipendentemente dal livello di approfondimento che la complessità del sito richiede. Il metodo consente la determinazione delle sollecitazioni di natura cinematica [IJ02, NC05, IC06], che si sviluppano lungo i pali conseguentemente alla propagazione delle onde sismiche. L'impostazione del problema inoltre consente la determinazione della matrice di impedenza dinamica [IJ02, NC03, IC03], del sistema fondazione-terreno e l'individuazione del moto di input per la sovrastruttura a partire da un generico campo di spostamenti free-field.

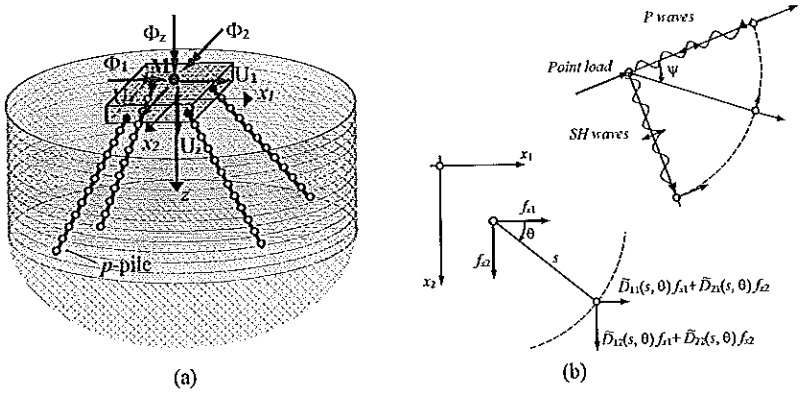

Figura 2: (a) Modello del gruppo di pali e (b) modello di propagazione ondosa

Nelle applicazioni sono state impiegate funzioni elastodinamiche di Green derivate a partire da impedenze dinamiche e da leggi di attenuazione definite in letteratura. La validazione del metodo è stata affrontata confrontando le funzioni di impedenza dinamica e i parametri di risposta cinematica forniti dalla procedura sviluppata con risultati disponibili in letteratura, variando la rigidezza del terreno, la geometria della palificata e l'angolo di inclinazione dei pali. Le sollecitazioni lungo i pali sono state confrontate con quelle ottenute da modellazioni 3D agli elementi finiti (secondo un approccio di analisi di tipo diretto).

Nell'ambito dello stesso tema, è stata sviluppata una procedura analitica basata su un modello di trave alla Winkler di tipo dinamico, per l'analisi di interazione cinematica di singoli pali inclinati [IJ3, NC08]. Per il palo è stato considerato il modello di trave di Bernulli mentre l'interazione palo-terreno è colta ricorrendo alla soluzione del problema elastodinamico delle vibrazioni armoniche di un disco rigido nel terreno, in condizioni piane di deformazione. Il comportamento accoppiato, assiale e flessionale, di un segmento di palo compreso in uno strato di terreno omogeneo è governato da un sistema di equazioni differenziali, con le relative condizioni al contorno, che è risolto analiticamente ricorrendo alle proprietà delle matrici esponenziali e alla loro applicazione nella soluzione di sistemi di equazioni differenziali. La soluzione relativa a pali in terreni stratificati è ottenuta derivando analiticamente la matrice di rigidezza del sistema palo-terreno nel singolo strato omogeneo e assemblando le matrici in accordo al "direct stiffness method". Sono state infine eseguite delle applicazioni per dimostrare l'efficienza del modello, confrontando i risultati ottenuti dal modello con risultati disponibili in letteratura, derivati da formulazioni agli elementi di contorno.

Comportamento dinamico di rilevati

Con specifico riferimento ai ponti, e all'importanza dell'interazione spalla-rilevato nella valutazione della risposta sismica, è stato sviluppato un modello 2D di tipo higher order per lo studio della risposta dinamica lineare di rilevati stradali [IJ01, IC01, NC01]. L'osservazione diretta di danni a spalle da ponte (e.g. perdita di appoggio e pounding) conseguenti a terremoti di alta intensità hanno dimostrato infatti che questo tipo di interazione può essere particolarmente importante nel caso di cavalcavia autostradali che classicamente hanno le spalle fondate su rilevati in terra. Adottando un approccio alle sottostrutture, il modello sviluppato permette di includere il contributo di cedevolezza e l'azione trasmessa dai rilevati nella valutazione della risposta longitudinale e trasversale di ponti caratterizzati da un percorso duale di carico (impalcato vincolato alle spalle). Il modello proposto permette di superare alcuni dei limiti tipici delle formulazioni attualmente disponibili in letteratura come ad esempio la conoscenza a priori della lunghezza effettiva del rilevato che partecipa alla risposta del ponte (tipica dei modelli basati sulla trave deformabile a taglio o sul modello shear-wedge). Il modello proposto permette di ottenere, nel dominio della frequenza, la matrice di impedenza dinamica e quella di risposta cinematica di rilevati caratterizzati da un piano di simmetria verticale. Il modello è stato opportunamente validato studiandone la convergenza e confrontandone i risultati con quelli ottenuti da una modellazione solida tridimensionale. I confronti, in termini di funzioni di impedenza e funzioni di risposta cinematica, dimostrano l'efficienza del modello nel cogliere la risposta dei più sofisticati modelli tridimensionali contenendo l'onere computazionale, dato che il modello proposto riproduce in

modo accurato la risposta dei modelli solidi adottando un numero di gradi di libertà 7.5 volte inferiore. Il modello è stato utilizzato per condurre un'analisi parametrica sulla risposta cinematica di rilevati stradali di approccio ai ponti; i parametri variati nell'analisi sono l'altezza del rilevato, la pendenza delle scarpate e la pendenza longitudinale. Si è inoltre ipotizzata la presenza di una spalla rigida e, per ciascun caso di analisi, è stata valutata la lunghezza effettiva del rilevato che partecipa alla risposta del ponte.

Effetti dell'interazione terreno-fondazione-struttura nella risposta sismica di strutture

Procedure di analisi

Gli effetti dell'interazione dinamica terreno-fondazione-struttura sono indagate con riferimento a strutture di particolare interesse come i ponti. L'approccio di calcolo adottato è quello per sottostrutture; salvo diversa indicazione nel seguito, l'analisi è stata condotta in campo non lineare per quanto riguarda le strutture utilizzando modelli a plasticità concentrata o diffusa, mentre l'interazione cinematica e la valutazione della rigidezza dinamica dei sistemi terreno-fondazione è stata eseguita ipotizzando un comportamento lineare del sistema e tenendo conto, ove necessario, del contributo non lineare del terreno in modo lineare equivalente. In particolare, le analisi di interazione cinematica sono state eseguite nel dominio delle frequenze avvalendosi di procedure numeriche appositamente sviluppate [IJ02]. Queste procedure forniscono le funzioni di impedenza dinamica del sistema terreno-fondazione ed il moto a livello di fondazione. Le analisi di interazione inerziale sono invece eseguite nel dominio del tempo, per includere il comportamento strutturale non lineare. Poiché le funzioni di impedenza, dipendenti dalla frequenza, non sono più compatibili con la tipologia di analisi, è necessario definire un opportuno sistema di vincolo per la struttura, i cui parametri siano indipendenti dalla frequenza. A tale scopo sono stati utilizzati modelli a parametri concentrati (Lumped Parameter Models), costruiti assemblando molle, smorzatori e masse i cui parametri, indipendenti dalla frequenza, sono calibrati in modo tale che il loro comportamento dinamico approssimi quello delle fondazioni in un opportuno range di frequenze di interesse. A questo scopo è stato utilizzato un modello a parametri concentrati, costituito da 25 parametri, capace di cogliere il comportamento dinamico di fondazioni caratterizzate da due assi di simmetria, tenendo debitamente conto anche degli accoppiamenti roto-traslazionali, tipici delle fondazioni profonde (Figura 3). Per l'azione sismica sono stati utilizzati set di accelerogrammi reali mediamente compatibili con gli spettri forniti dai codici per la roccia affiorante. Il moto di free-field all'interno del deposito di terreno è studiato con analisi di risposta locale (analisi di propagazione monodimensionale) in cui si tiene conto del comportamento non lineare del terreno in modo equivalente. A prescindere dai fenomeni di interazione l'analisi di sito produce una modificazione degli spettri di risposta di input alle strutture determinando l'insorgere di picchi in corrispondenza delle frequenze proprie del deposito. Alla luce delle amplificazioni legate alla risposta locale, l'inclusione degli effetti di interazione nelle analisi di risposta sismica delle strutture, determinando un incremento dei periodi fondamentali delle stesse, potrebbero causare un aumento o un decremento dell'azione di input che deve essere valutato caso per caso.

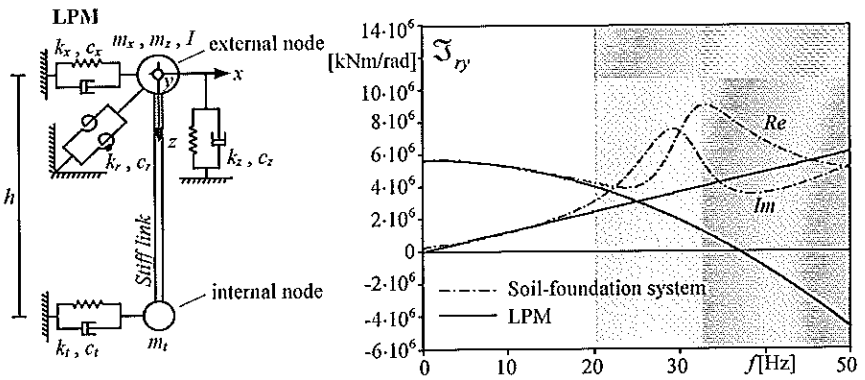

Figura 3: Esempio di approssimazione dell'impedenza dinamica della fondazione con un LPM

Analisi di viadotti multicampata

Con riferimento alle strutture da ponte sono state eseguite analisi per la valutazione degli effetti di interazione terreno-struttura su viadotti multi-campata (Figura 4) caratterizzati da pile di altezza costante fondate su pali ad asse verticale ed impalcato costituito da un bitrave continuo a sezione mista acciaio-calcestruzzo, connesso in condizioni dinamiche, alle sole pile e svincolato agli appoggi. Inoltre diverse altezze duttilità delle pile, e diverse luci delle campate dell'impalcato sono state considerate. Le analisi sono state condotte in campo non lineare per la struttura (pile) ricorrendo ad una modellazione a plasticità distribuita, mentre l'analisi del sistema terreno-fondazione è sviluppata considerando l'ipotesi di linearità. Per il terreno di fondazione è stato selezionato un terreno di categoria D, mentre con riferimento all'input sismico, nelle prime analisi, è stata considerata una selezione di un set di accelerogrammi reali spettro-compatibili su roccia e propagati dal bedrock nel deposito per tener conto degli effetti della risposta sismica locale. La procedura di analisi implementata insieme alle le prime applicazioni sviluppate hanno mostrato [IC02], in un confronto tra modellazione del sistema a base fissa con il sistema a base cedevole, che gli effetti dell'interazione producono un lieve aumento gli spostamenti dell'impalcato ed una conseguente maggiore richiesta di duttilità per la sottostruttura. Successivamente una diversa procedura di selezione e scalatura degli accelegrammi è stata implementata [IC04, NC02] ed una casistica maggiore di configurazioni di ponti è stata indagata. I risultati hanno evidenziato che l'interazione terreno-struttura non gioca un ruolo essenziale in terreni soffici, ma determina un incremento degli spostamenti, e conseguentemente un incremento della domanda di rotazione plastica delle cerniere alla base delle pile, di circa il 15% nei casi studio caratterizzati dalle pile di maggior rigidezza.

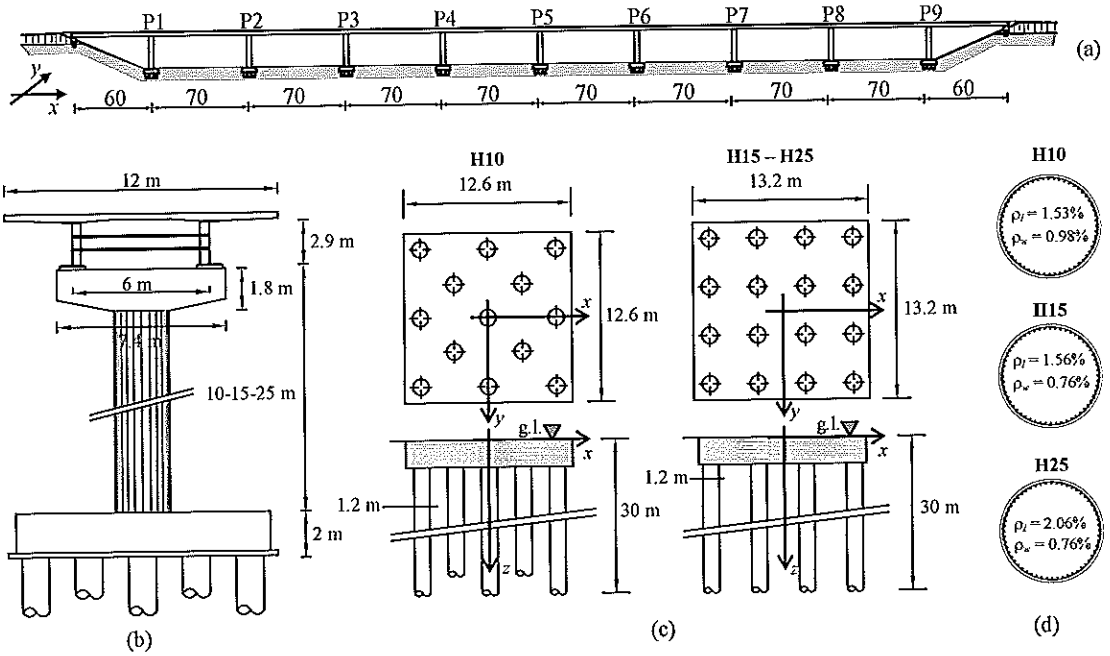

Figura 4: (a) Vista laterale del viadotto; (b) Pila in elevazione; (c) fondazione (d) armature longitudinale e trasversale della pila

Analisi degli effetti del non sincronismo nell'analisi sismica di viadotti

Recentemente, il filone di ricerca relativo allo studio degli effetti dell'interazione nella risposta sismica dei ponti, è stato arricchito del tema del non-sincronismo dell'azione di input, che può essere importante nel caso di ponti multi-campata di notevole sviluppo. In questi casi infatti, le pile dei diversi supporti possono essere fondate su terreni diversi che quindi produco amplificazioni locali differenti del moto di free-field, in aggiunta ai ben noti fenomeni associati ai differenti tempi di arrivo dell'onda sismica ai diversi supporti e alla perdita di coerenza indotta dalle riflessioni e rifrazioni multiple. Da considerare inoltre che le fondazioni, interagendo con i differenti terreni, producono un ulteriore "non sincronismo" dell'azione associato ai diversi meccanismi di interazione cinematica. Con

lo scopo di indagare il contributo del non sincronismo prodotto dai soli effetti di sito e congiuntamente il contributo dell'interazione terreno-struttura nella risposta sismica dei viadotti lunghi, sono state eseguite delle analisi su alcuni dei casi studio della ricerca descritta al precedente paragrafo. Nello specifico sono stati indagati gli effetti prodotti da una configurazione geometrica del deposito di terreno di tipo bidimensionale costituita da un interfaccia bedrock-terreno deformabile inclinata di 15° rispetto alla direzione longitudinale dei ponti (Figura 5). Le amplificazioni locali prodotte dalla risposta del deposito sono state valutate indipendentemente nelle due direzioni principali del ponte ricorrendo ad una modellazione 1D del fenomeno ed isolando le colonne di terreno al di sotto di ciascun supporto. Le prime applicazioni sono state dedicate alla valutazione degli effetti prodotti dall'inclinazione dell'interfaccia del bedrock, i quali sono stati quantificati confrontando i risultati delle analisi con quelli ottenuti da una configurazione del bedrock orizzontale. Le analisi, eseguite considerando in entrambi i casi l'interazione terreno-struttura, evidenziano che la variabilità spaziale del moto prodotto dalle amplificazioni stratigrafiche ha un effetto importante sulla risposta sismica delle strutture considerate [IC09, NC07]. Successivamente, sono state sviluppate delle applicazioni finalizzate ad indagare anche il ruolo dell'interazione terreno-struttura ed il contributo associato a differenti modellazioni per la definizione della risposta bidimensionale del deposito. Nello specifico, sono state confrontate le risposte strutturali e analizzate azioni di input derivanti da una modellazione 2D non lineare della risposta del deposito con bedrock inclinato nella direzione longitudinale del ponte [NC09]. In queste applicazioni gli effetti dell'interazione sono evidenziati rapportando i risultati ottenuti (e.g. in termini di spostamenti dell'impalcato, duttilità delle pile) con quelli derivanti da una modellazione a base fissa Queste valutazioni sono state eseguite sia sui risultati delle analisi strutturali ottenute impiegando quali azioni di input i risultati delle analisi 2D, che quali azioni di input i risultati delle analisi 1D. Le applicazioni hanno dimostrato che, per le strutture indagate, la domanda strutturale ottenuta considerando le azioni non sincrone dei modelli 2D è sensibilmente maggiore di quella ottenuta adottando i modelli 1D, verosimilmente a causa del comportamento plastico sviluppato dal deposito nel primo caso, e che l'interazione terreno-struttura risulta più significativa nel caso in cui l'azione sismica derivi da modellazioni 1D.

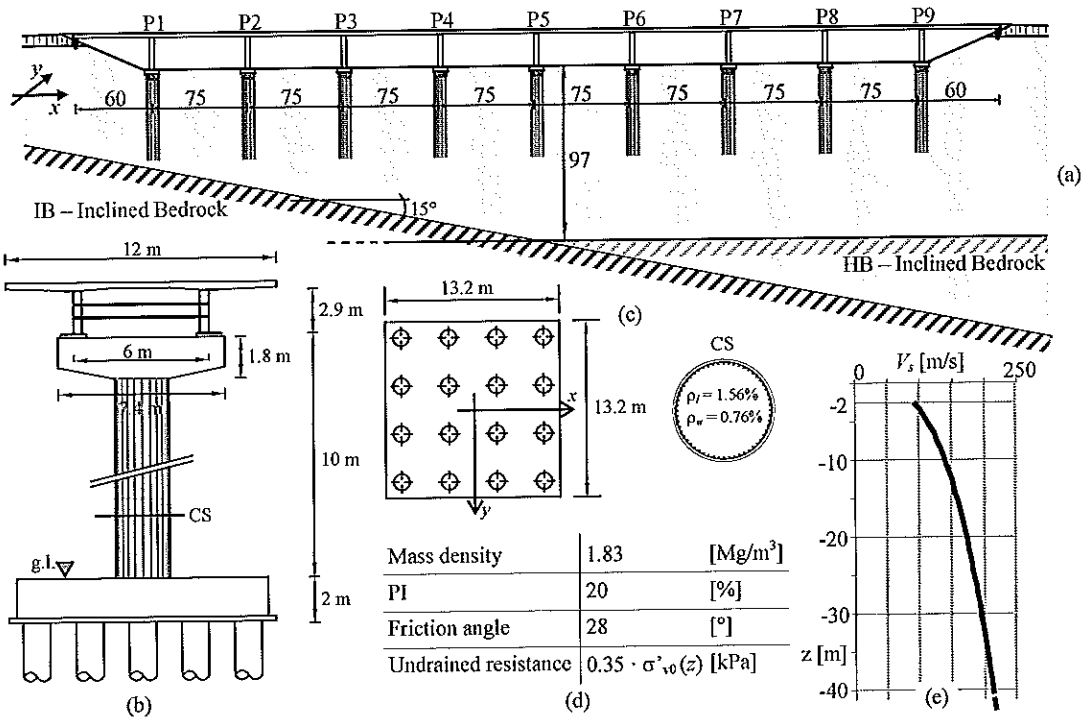

Figure 5. (a) Vista laterale del viadotto; (b) Pila in elevazione; (c) Sistema di fondazione e sezione dei pali, (d) Proprietà meccaniche del terreno (e) Profilo delle velocità Vs fino a 40 m di profondità.

Analisi di pile fondate su pali inclinati

Alcuni studi sono stati dedicati all'analisi di singole pile fondate su gruppi di pali inclinati. Tale schema è rappresentativo di cavalcavia con una sola pila intermedia e di ponti multi-campata caratterizzati da pile di uguale altezza, nei quali è possibile escludere, un percorso di carico duale che coinvolge l'impalcato trasversalmente. Sebbene per le pile si ipotizzi in questa fase della ricerca un comportamento lineare, le analisi sono state eseguite adottando un approccio per sottostrutture. In particolare sono stati considerati gruppi di pali con differente geometria e pali con diversa inclinazione (Figura 6). L'approccio adottato, per sottostrutture, permette di indagare separatamente gli effetti cinematici ed inerziali in fondazione, al variare della geometria della palificata, e di evidenziare il contributo dell'interazione nella definizione del moto sismico per le analisi delle sovrastrutture (moto della fondazione).

I risultati delle analisi permettono di esprimere alcune considerazioni circa l'influenza della configurazione della palificata e dell'inclinazione dei pali sul comportamento strutturale delle pile (spostamenti e caratteristiche di sollecitazione) e sulla risposta delle fondazioni (massimi tagli e momenti flettenti nei pali dovuti all'interazione cinematica e inerziale) [NC04, NC06, IC08]. In particolare dalle analisi è emerso, in termini medi, una riduzione dello spostamento massimo orizzontale al livello della fondazione al crescere dell'inclinazione dei pali, mentre per quanto riguarda la componente rotazionale, si ha un sensibile incremento della massima rotazione della fondazione. In aggiunta occorre osservare che, nel caso di pali inclinati, ad uno spostamento positivo della zattera di fondazione corrisponde una rotazione contraria a quella che si avrebbe nel caso di pali verticali. Nei confronti della sovrastruttura si osserva una riduzione dello spostamento al crescere dell'angolo di inclinazione dei pali; questo è essenzialmente dovuto al contributo della rotazione della fondazione che, nelle palificate con pali inclinati, determina uno spostamento della sovrastruttura discorde in segno con quello generato dalle forze di inerzia. Con riferimento alle sollecitazioni lungo il fusto dei pali si osserva con riferimento alle sollecitazioni cinematiche nel caso di pali inclinati una forza assiale significativa che cresce all'aumentare dell'angolo di inclinazione rispetto alla configurazione con pali verticali; tagli e momenti flettenti sono invece paragonabili con quelli ottenuti nel caso di pali verticali. Le sollecitazioni inerziali, come atteso, attingono il loro massimo valore in testa al palo. Rispetto ai risultati ottenuti dalla configurazione a pali verticali, all'aumentare dell'angolo di inclinazione si osserva una crescente riduzione di tutte le caratteristiche di sollecitazione.

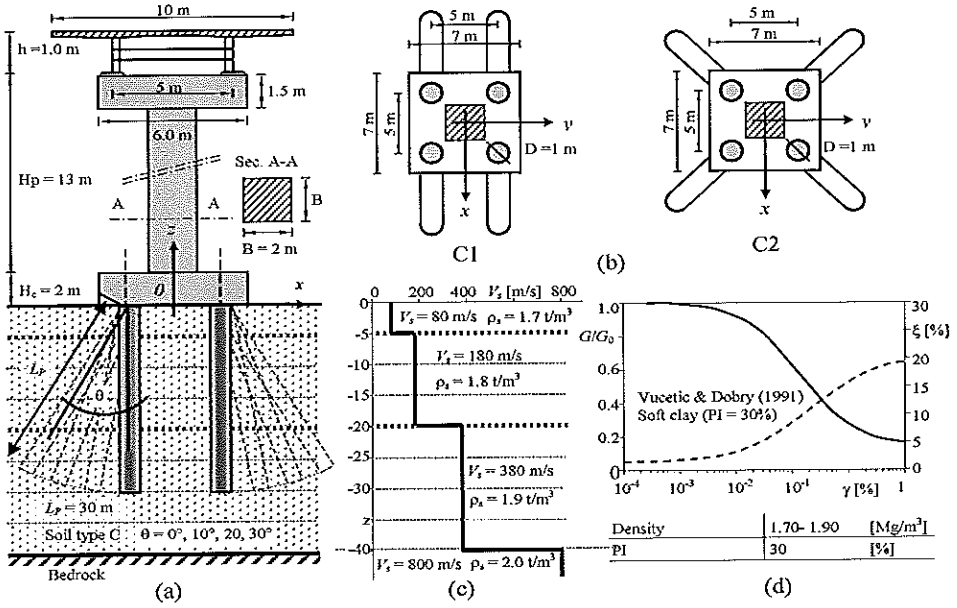

Figura 6: (a) Sezione trasversale del sistema sovrastruttura-fondazione-terreno; (b) Geometria fondazioni; (c) velocità delle onde di taglio e profilo del deposito considerato e (d) curve di decadimento e smorzamento del terreno

Occasioni di Studio e Approfondimenti di Rilevante Interesse Scientifico

Nel contesto di una collaborazione col gruppo di ricerca dell'Università di Camerino, coordinato dal Prof. Dall'Asta, impegnato nel progetto europeo INNO-HYCHO (2010-2013), il sottoscritto ha avuto l'occasione di studiare il comportamento di telai in acciaio con pareti in calcestruzzo (SRCWs). Questi costituiscono un sistema sismo-resistente ibrido classificato come tipo 1 nell'Eurocodice 8 (EN1998-1), dove vengono trattati essenzialmente come una parete in c.a. capace di dissipare energia negli elementi verticali di acciaio e nelle armature verticali della parete. In realtà, il comportamento di questi sistemi può essere molto differente, fortemente caratterizzato dalle rotture per schiacciamento e dalle rotture per trazione, rispettivamente nelle diagonali compresse e tese della parete. Questi comportamenti sono fortemente correlati con l'assenza di specifiche metodologie di progetto basate sulla gerarchia di resistenza che permetta di controllare la formazione di un appropriato meccanismo dissipativo. Al fine di superare i suddetti aspetti critici è stato proposto un innovativo sistema ibrido nell'ambito del progetto europeo INNO-HYCHO: il sistema è concepito per controllare la formazione di puntoni diagonali nella parete che si comporta come un "controvento" anziché come una parete resistente a taglio. La dissipazione di energia ha luogo negli elementi verticali del telaio in acciaio soggetti principalmente a forze assiali, senza coinvolgere l'armatura della parete [IC05]. Per valutare l'efficienza del sistema proposto, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti costituito da elementi trave e link non lineari. I risultati di questo modello sono stati confrontati con quelli ottenuti da una modellazione raffinata che utilizza elementi shell a comportamento non lineare. Il modello semplice è risultato capace di cogliere la sequenza di fessurazione delle pareti e di snervamento degli elementi dissipativi. La procedura è stata applicata ad un caso studio costituito da un telaio di sei piani [IC07] al fine di dimostrare le capacità dell'innovativo sistema sviluppato.

Sassoferrato 30/11/2015

Dr. Ing. Michele Morici