



Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
124° (2006), Vol. XXX, P. II, pp. 261-277

BERNARDO A. SCHREFLER*

Problemi multidisciplinari nell'ingegneria **

Il tema che propongo in questa nota trova la sua motivazione in un'anomalia organizzativa del mondo accademico attuale. Mentre i settori scientifico-disciplinari, che catalogano competenze e campi di ricerca e di conseguenza fissano gli ambiti delle procedure di valutazione comparativa per il reclutamento dei professori universitari e dei ricercatori, hanno quasi esclusivamente carattere monodisciplinare, in ambito internazionale la ricerca è ormai decisamente orientata verso la multidisciplinarietà. Questo si verifica assai spesso nel campo dell'ingegneria ed anche in alcuni settori delle scienze naturali e della vita. Ne consegue che molti lavori scientifici recenti hanno uno spiccato carattere multidisciplinare e che alle volte non è ovvio ricondurli ad una determinata disciplina concorsuale. Nello stesso tempo, sorge la necessità di valutare correttamente la valenza scientifica di tali prodotti, soprattutto nell'ambito accademico.

A supporto di quanto affermato, illustro e commento alcuni dati relativi al prossimo congresso ICTAM della IUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) che si terrà ad Adelaide nel 2008 ed è il maggior congresso mondiale nel campo della meccanica. Sono previste rispettivamente 19 e 20 sessioni per la meccanica dei fluidi e per quella dei solidi e 9 sessioni che coinvolgono ambedue i settori della meccanica più altre discipline. Ancora, il recente Congresso mondiale di Meccanica Computazionale WCCMVII, tenutosi nel luglio scorso a Los Angeles, era organizzato in larga parte in minisimposia e circa la metà di questi aveva carattere multidisciplinare.

Questa tendenza si accentua nel caso dei progetti di ricerca: per avere qualche chance di successo, in campo sia nazionale che europeo, è quasi d'obbligo proporre

* Socio dell'Accademia. Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova, Via Marzolo 9, 35131 Padova. E-mail: bernhard.schrefler@unipd.it

** Relazione presentata in occasione della Seconda Assemblea Annuale 2006, 3 ottobre 2006, Aula Consiliare, Palazzo dei Celestini, Lecce.

temi che presentino aspetti tipici di interdisciplinarietà e che quindi richiedano la collaborazione di competenze che si colleghino a discipline differenti.

I problemi pluridisciplinari di maggior interesse sono quelli in cui si verifica un'effettiva interazione tra campi diversi, tradizionalmente studiati in settori distinti. In questi casi non si tratta semplicemente di considerare i risultati di un campo ed utilizzarli come dati di ingresso per lo studio di un altro campo, ma, nello studio del problema, bisogna considerare contemporaneamente le interazioni fra tutti i campi coinvolti. Di questa tipologia di problemi multidisciplinari, detti accoppiati, presento ora qualche esempio per evidenziarne la grande varietà. Si può affermare che quasi sempre la risoluzione di questi problemi è resa possibile dall'uso di metodi numerici e richiede la disponibilità di mezzi di calcolo molto evoluti e potenti. Come tipico esempio vorrei citare l'interazione tra fluido e struttura che permette di studiare l'assetto in volo di un intero velivolo. In questo caso si è in presenza di un numero limitato di campi interagenti (solido e fluido) e, anche se le interazioni avvengono lungo le superfici del velivolo, il problema richiede una notevole mole di calcolo, dovendosi studiare le equazioni di Navier-Stokes in domini illimitati. Modelli matematici per lo studio di interazioni in geomateriali, quali suoli, rocce e calcestruzzi, vedono spesso un maggior numero di campi coinvolti. Situazione analoga si riscontra in alcuni problemi di meccanica dei tessuti biologici. Gli esempi che ora illustrerò riguardano il comportamento di geomateriali, la valutazione dell'impatto ambientale, problemi elettro-termo-meccanici nella fusione termonucleare controllata e la meccanica dei tessuti biologici.

Il mio primo incontro con le tematiche dei problemi accoppiati risale alla metà degli anni settanta, quando un collega mi suggerì di analizzare la possibilità di simulare la subsidenza di Venezia (Fig. 1) causata dall'estrazione di acqua dagli acquiferi presenti nel sottosuolo di Marghera. Dopo una breve ricerca avevo capito che il problema si poteva risolvere mediante la teoria di Biot. Questa prevede l'interazione tra il moto dei fluidi nei pori del terreno e la deformazione della fase solida che contiene i pori. In questo caso, l'interazione si verifica in ogni punto, con un'ovvia complicazione del problema. La teoria di Biot era stata formulata nell'ambito della geomeccanica per lo studio degli effetti dovuti all'estrazione di idrocarburi ed era già stata applicata alla consolidazione dei terreni. Avevo individuato l'Università del Galles-Swansea come il centro di ricerca dove si stava studiando questo argomento anche dal punto di vista computazionale. Nonostante lo scetticismo manifestato da molti dei colleghi più anziani e i loro assai scarsi incoraggiamenti ad affrontare questi studi, trovai un finanziamento CNR per trascorrere un periodo di studio presso quella Università britannica.

La subsidenza di Venezia consiste in una perdita di quota rispetto al livello medio del mare ed è dovuta all'azione congiunta dell'eustatismo e della compattazione naturale di terreni relativamente giovani, ma soprattutto all'attività umana (Fig. 2). Il sottosuolo di Venezia è composto da un'alternanza di acquiferi (strati sabbiosi) e di strati impermeabili (argillosi). All'epoca venivano emunti sei acquiferi

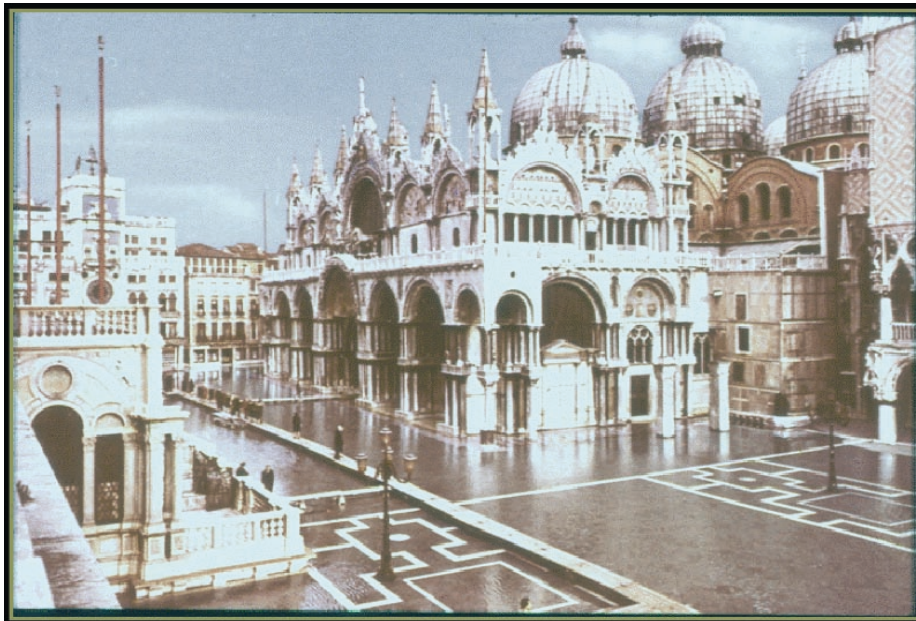


Fig. 1 – Acqua alta a Venezia: la frequenza del fenomeno è aumentata notevolmente a causa della subsidenza.

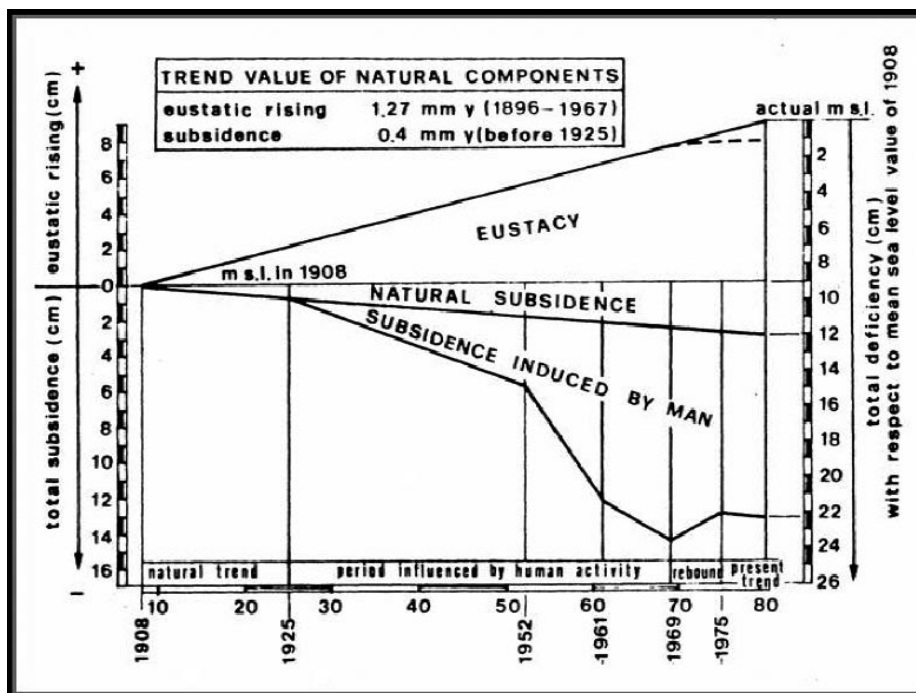


Fig. 2 – Abbassamento rispetto al livello medio del mare (Da Gatto, P. e Carbognin L., 1981, The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man induced modification. *Hydr. Sci. Bull.*, 26, 379-91).

(Fig. 3). Mettendo in conto le quantità di acqua estratta e tenendo conto delle caratteristiche del terreno ottenute da un pozzo scavato a tale scopo, è stato possibile sia simulare il comportamento osservato fino ad allora sia fare qualche previsione sulla risalita (peraltro modesta) del terreno per cessata estrazione di acqua (Fig. 4).

Più complesso si rivela il tema della subsidenza del terreno sopra giacimenti gassiferi: dalle misure *in situ* si è visto che questo fenomeno si manifesta sia durante la fase di estrazione di gas sia dopo la chiusura dei pozzi. Questo è un problema di interazione fra tre campi: pressione dell'acqua, pressione del gas e deformazione del terreno (con possibile dipendenza anche dalla temperatura). Come esempio di questo tipo cito il caso di Ravenna (Fig. 5), per il quale esistono dati sull'abbassamento in superficie non solo durante la fase di produzione del gas, ma anche dopo, sia pure limitatamente al campo di Ravenna terra. È stato osservato un comportamento nettamente diverso tra i due momenti, ovvero la forma del "cono" presenta nel primo caso il vertice verso il basso, mentre nella fase successiva il cono risulta capovolto, con il minimo della subsidenza sopra il giacimento stesso (Fig. 6). Questo comportamento potrebbe essere attribuito all'effetto delle pressioni capillari che vengono ridotte con l'ingresso di acqua che viene a sostituire il gas estratto.

Altri esempi di problemi accoppiati nella geotecnica sono relativi alla dinamica delle terre. Casi assai noti sono relativi al comportamento di dighe in terra in caso di terremoto, come quella di Acciano (PG) (Fig. 7) e all'innesco di frane come quella di Sarno (Fig. 8) in concomitanza a precipitazioni piovose di forte intensità. In entrambi i casi l'effetto instabilizzante dei paramenti e del terreno è riconducibile alla pressione dell'acqua contenuta nei pori.

Ancora più complesso è il comportamento di calcestruzzi sottoposti ad alte temperature. Il materiale non deve essere pensato come un sistema monolitico e continuo, ma piuttosto come un corpo con discontinuità diffuse e interconnesse (pori) attraverso cui c'è trasporto di acqua, aria secca, vapor acqueo e calore, con cambi di fase dei componenti, ovvero evaporazione o condensazione. Il modello matematico formulato, assai più aderente alla realtà dei modelli tradizionali, permette di cogliere fenomeni in precedenza non simulabili, quali il distacco esplosivo o lento di parti di strutture di calcestruzzo in caso di incendio (Fig. 9, 10), fenomeno noto col nome di spalling. Lo stesso modello del calcestruzzo sopra indicato deve essere ulteriormente ampliato se si vuole simulare il comportamento della volta di calcestruzzo di una galleria in caso di incendio (Fig. 11). A tale scopo occorrono dati affidabili riguardanti il carico termico agente sulla volta e gli scambi tra questa e l'interno della galleria. Lo studio di questo problema richiede quindi competenze e collaborazione tra esperti di meccanica dei solidi, dei fluidi e di fisica tecnica (Fig. 12, 13).

Problemi attuali di tutt'altro genere, ma sempre pluridisciplinari, sono connessi con la realizzazione del reattore per la fusione termonucleare controllata ITER (Fig. 14), attualmente in costruzione a Cadarache in Francia. In questo reattore si prevede di produrre energia dalla fusione di Deuterio e Trizio, operazione

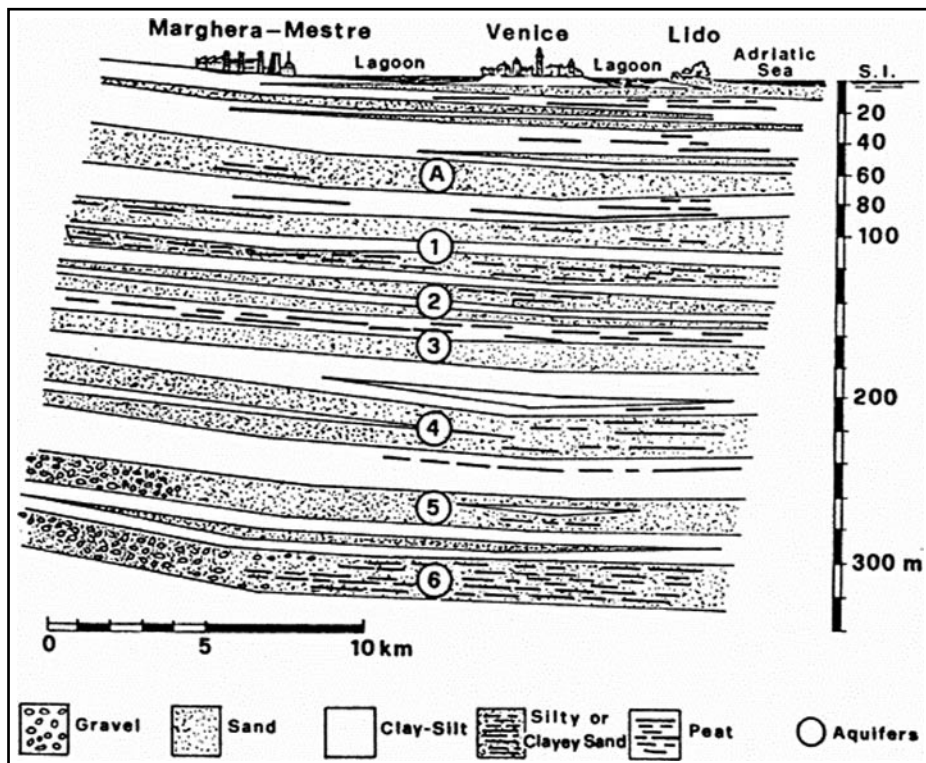


Fig. 3 – Stratigrafia del sottosuolo.

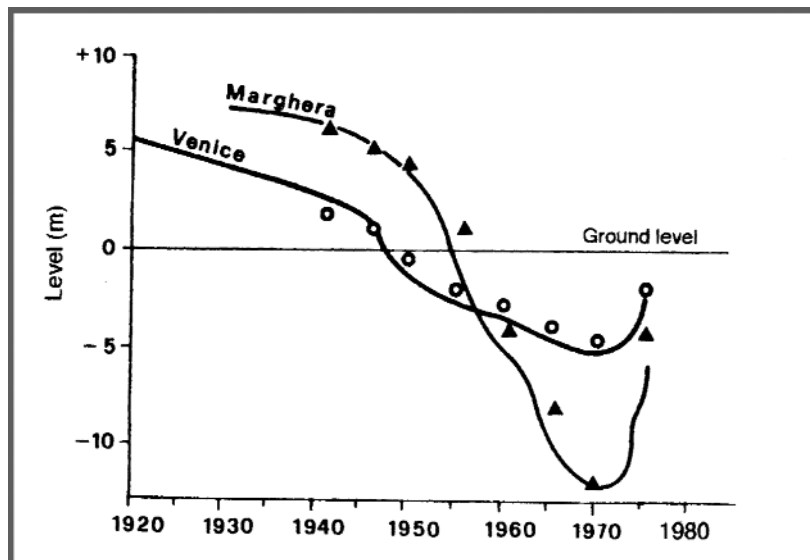


Fig. 4 – Evoluzione del livello negli acquiferi. Linea continua: valori calcolati; cerchi e triangoli: valori misurati.



Fig. 5 – Ravenna: effetti della subsidenza.

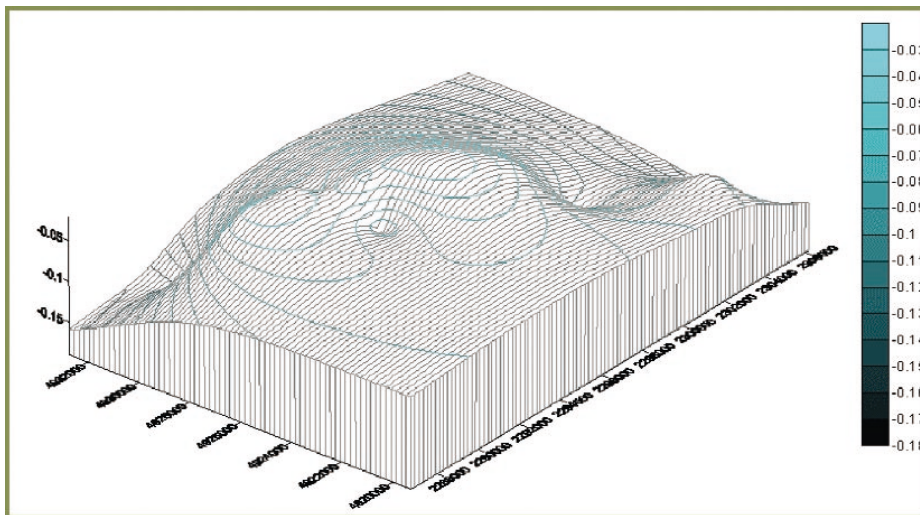
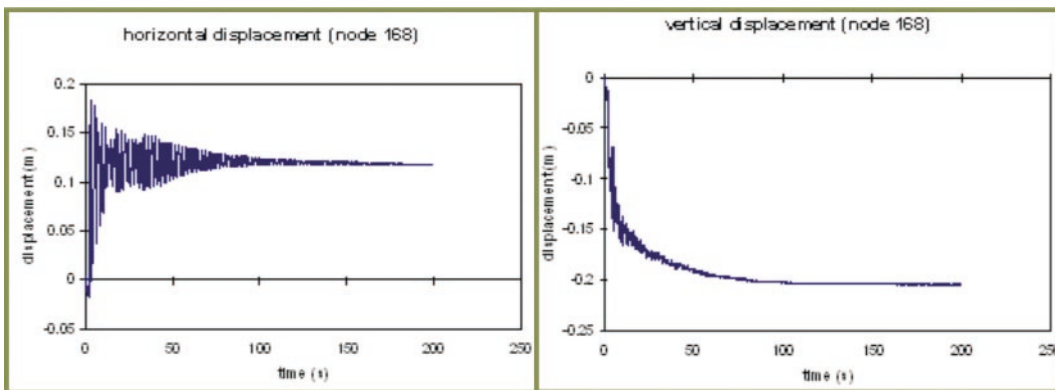
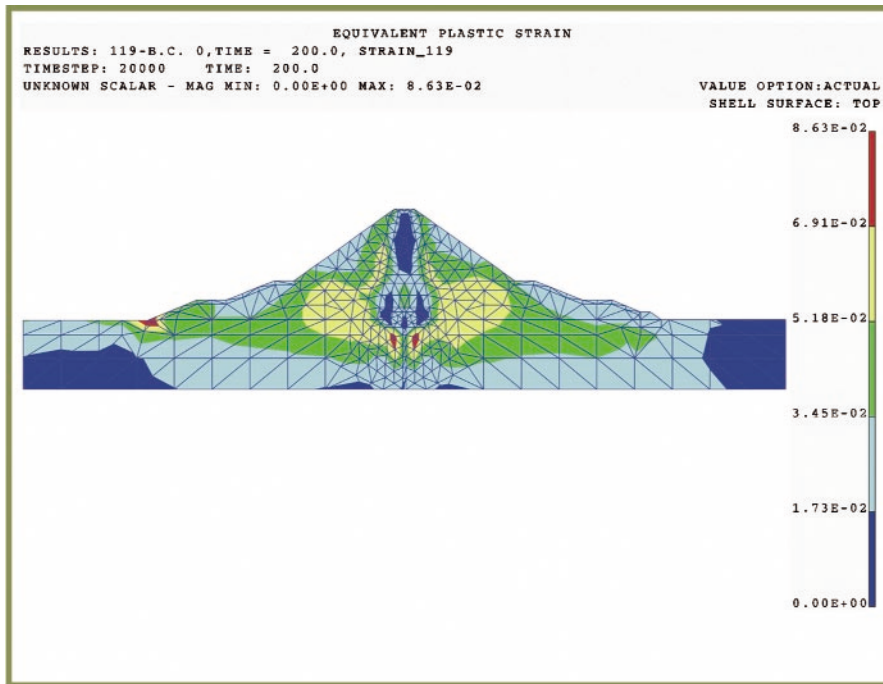


Fig. 6 – Subsidenza sopra il giacimento Ravenna terra: confronto 1998-1982 (anno di chiusura dei pozzi).



Measured horizontal displacement		Measured vertical displacement	
Datum point	Disp. (m)	Datum point	Disp. (m)
3	0.079	3	-0.247
4	0.114	4	-0.250
5	0.071	5	-0.150

Fig. 7 – Risultati dell'Analisi sismica della diga di Acciano (PG).

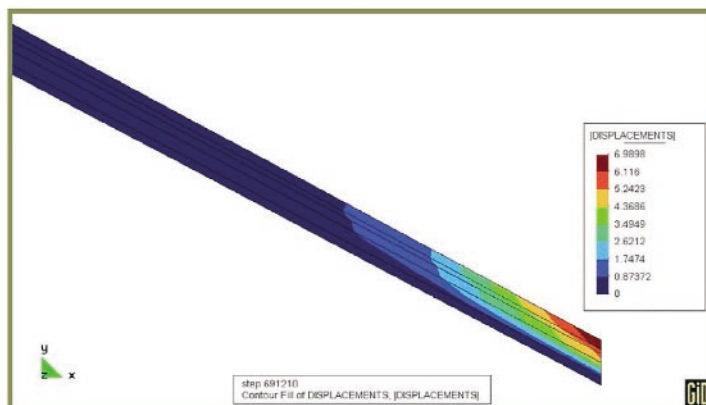
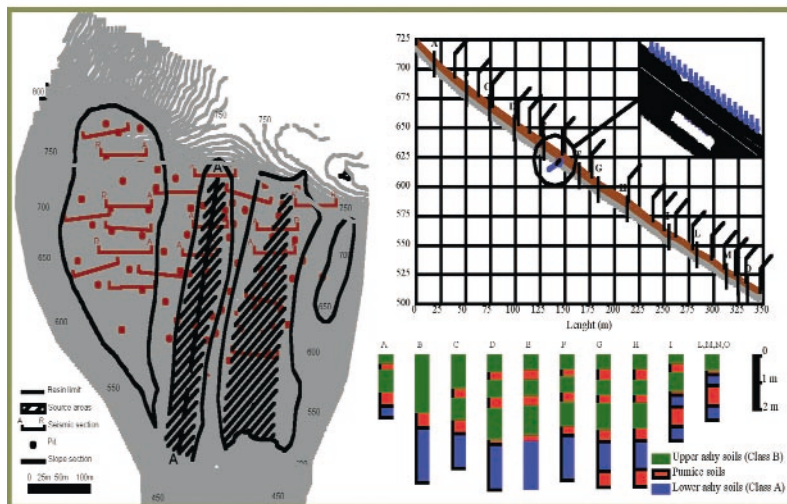
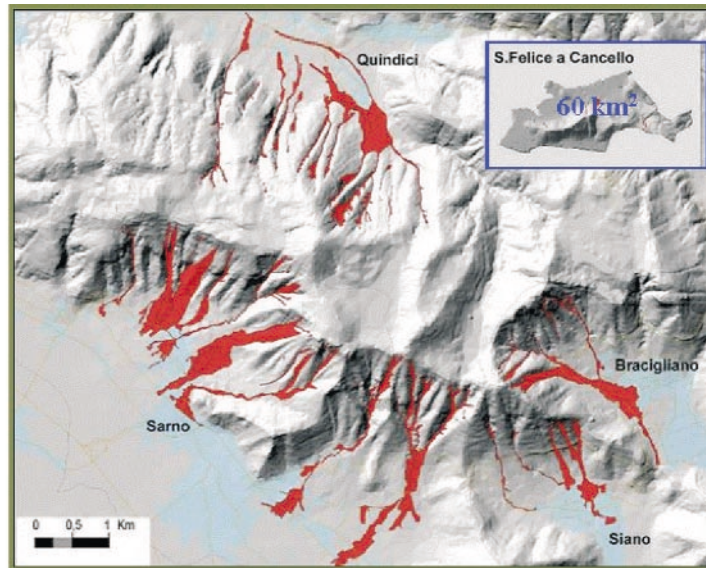


Fig. 8 – La frana del Sarno è l'analisi numerica del suo innesco con un modello multifase.

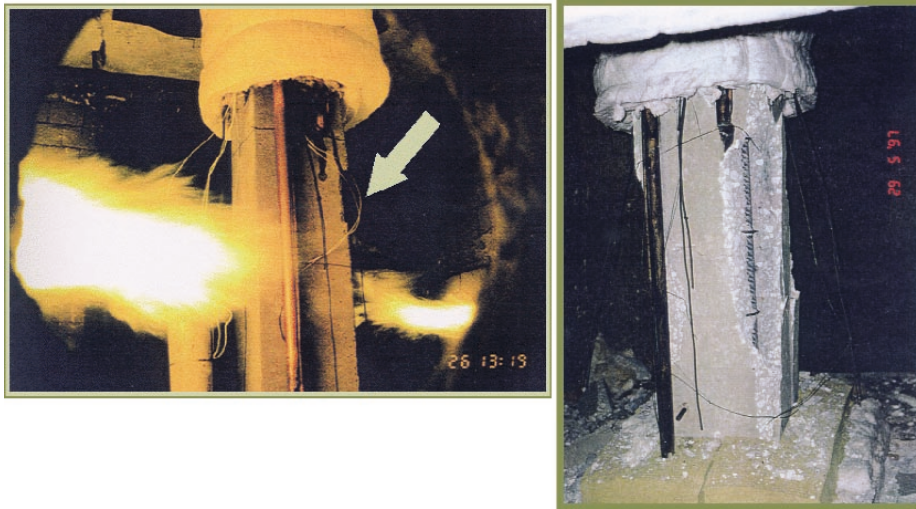


Fig. 9 – Prova a fuoco su di una colonna di calcestruzzo ad alta resistenza.

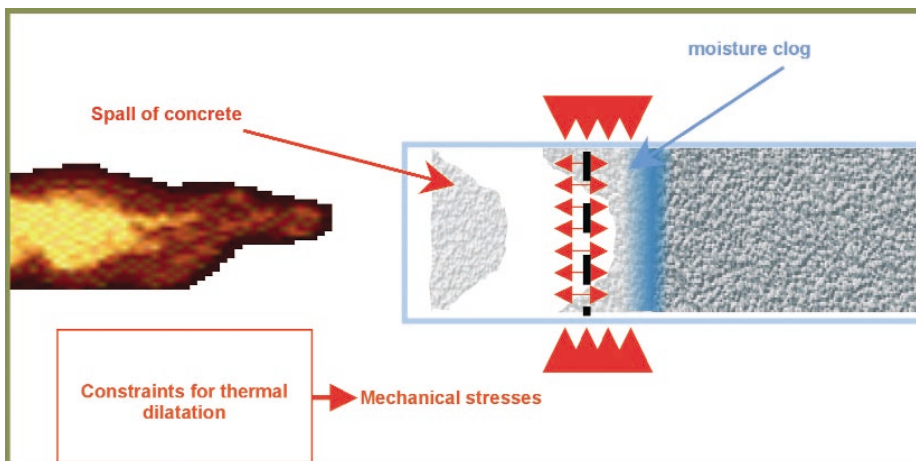


Fig. 10 – Meccanismo di spalling.



Fig. 11 – Incendio nella Galleria del S. Gottardo (sinistra) ed effetti del fuoco nella Galleria dei Tauri (destra).

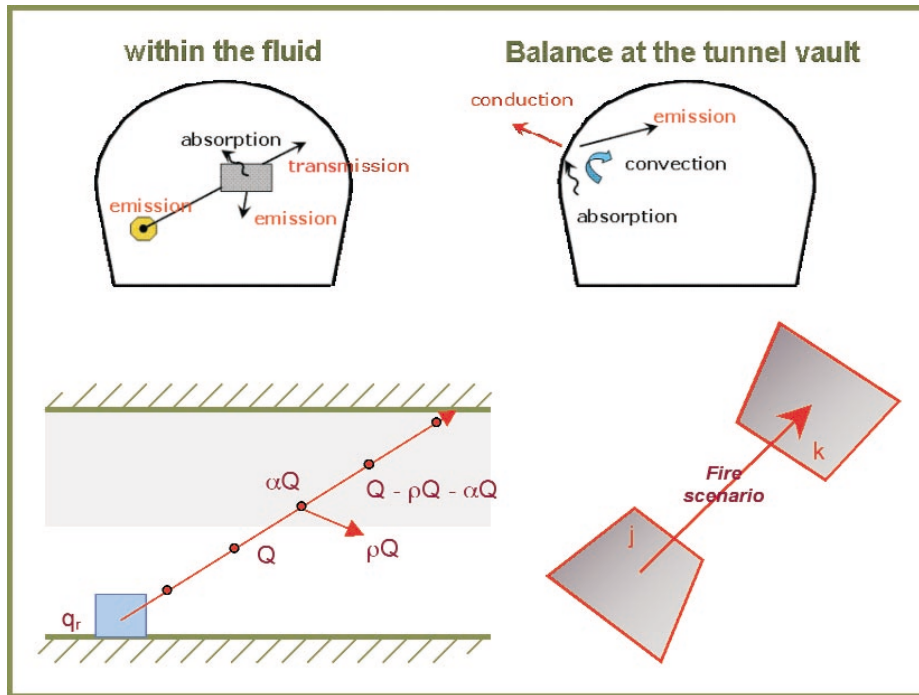


Fig. 12 – Meccanismi per il calcolo del carico termico.

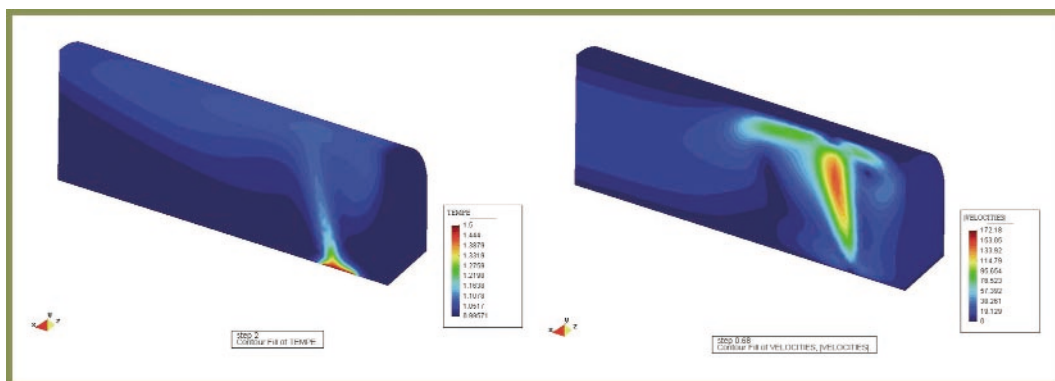


Fig. 13 – Distribuzione delle temperature e delle velocità dell'aria e del fumo durante un incendio in galleria.

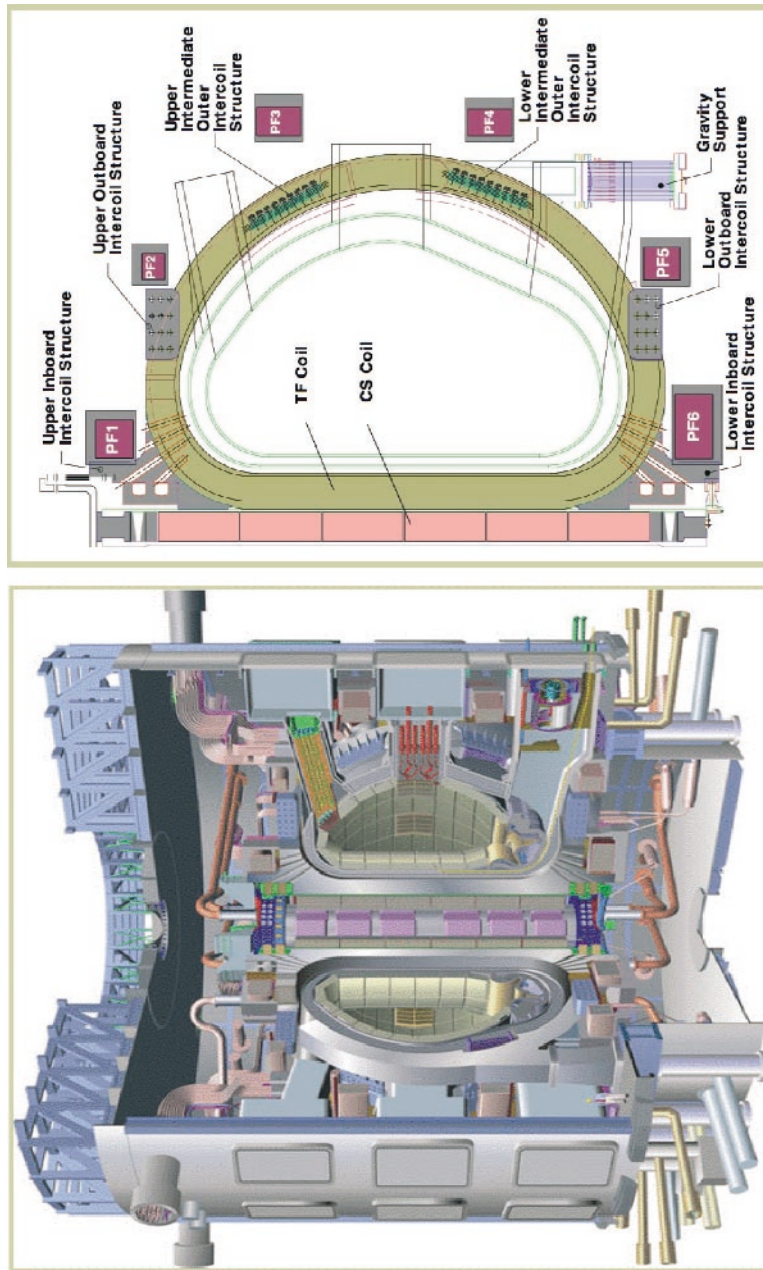


Fig. 14 – International thermonuclear experimental reactor (ITER): spaccato e particolare del sistema di bobine superconduttive.

che avviene in un plasma alla temperatura di circa 100 milioni di gradi, confinato da campi magnetici prodotti con bobine superconduttive. Tali bobine sono uno dei componenti più delicati del progetto, in particolare quelle realizzate con superconduttori di Nb_3Sn . La superconduttività di questo materiale dipende fortemente dalla deformazione, oltre che dalla temperatura e dal campo magnetico applicato, pertanto è di fondamentale importanza prevedere in modo accurato le deformazioni residue dopo la realizzazione della bobina e le deformazioni durante la fase di utilizzo. Per risolvere questo problema sono stati applicati concetti di modellazione multiscala (Fig. 15). In questo approccio si utilizza la conoscenza del comportamento dei singoli componenti del superconduttore, senza adottare leggi di comportamento dei materiali di tipo fenomenologico a livello macroscopico. Per quanto complesse, esse infatti non si prestano a rappresentare compiutamente i legami costitutivi di tutte le grandezze che interagiscono. Con il metodo utilizzato si analizza invece il problema partendo dal livello più basso, in questo caso da una scala dell'ordine di micro-metri, per ottenere il comportamento termo-meccanico ai vari livelli, fino al livello macroscopico (scala dell'ordine dei centimetri per il singolo conduttore e dell'ordine dei metri per la bobina) (Fig. 16). Una volta eseguita l'analisi a livello globale, questo tipo di approccio permette di ritornare nei calcoli al livello microscopico, cioè al singolo filamento superconduttivo, di cui si calcolano in questo modo le deformazioni. L'analisi multiscala ha permesso di prevedere abbastanza bene le tensioni residue dovute alla realizzazione del superconduttore. Misurazioni successive ai calcoli eseguiti con il modello matematico hanno confermato l'attendibilità e l'efficacia del metodo adottato. Inoltre l'applicazione del modello matematico a provini sollecitati da forze di Lorentz ha permesso di simulare molto meglio il comportamento elettromagnetico (Fig. 17).

L'ultimo gruppo di esempi di interdisciplinarietà proviene dal campo della meccanica dei tessuti biologici, uno dei settori più di moda, anche per le forti conseguenze sociali e per la rilevanza con cui compaiono nei programmi della Comunità Europea.

I problemi di biomeccanica sommano alle difficoltà dei problemi accoppiati quelle relative alla definizione geometrica dei modelli numerici ed alla realizzazione di modelli costitutivi per i materiali presenti e per le strutture biologiche da analizzare. Sono stati formulati specifici modelli costitutivi per lo studio del comportamento meccanico: infatti non si deve tener conto solo dei fenomeni di danneggiamento, di collasso e di isteresi, ma si deve anche prevedere il recupero della funzionalità e la ricrescita dei tessuti biologici, sia duri che molli. Questi studi sono solitamente condotti in diretta correlazione con una vasta compagine di prove sperimentali realizzate su tessuti animali ed artificiali.

Una delle applicazioni tipiche della biomeccanica è la realizzazione di modelli interpretativi dei processi di interazione tra un impianto protesico ed il tessuto osseo corticale e trabecolare, tenendo conto delle differenti condizioni di integrazione ossea, con le relative proprietà meccaniche del tessuto perimplantare, in presenza di eventuali processi di distacco per trazione tra il tessuto e l'impianto (Fig. 18).

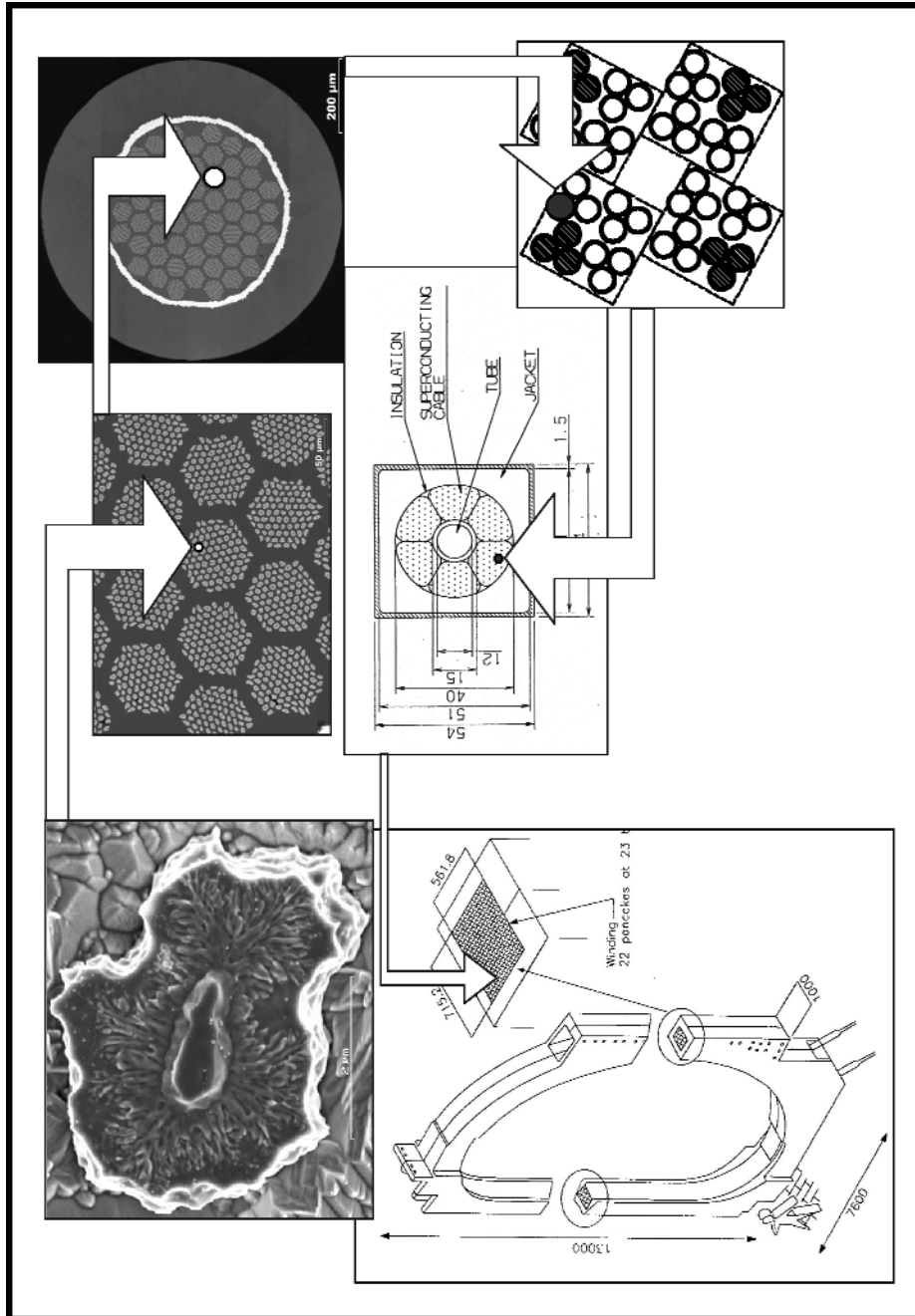


Fig. 15 – Modellazione multiscala con passaggi dal continuo rappresentato nelle prime tre immagini al discreto illustrato nelle immagini successive (prime tre fotografie: gentile concessione di P.J. Lee, Madison University USA).

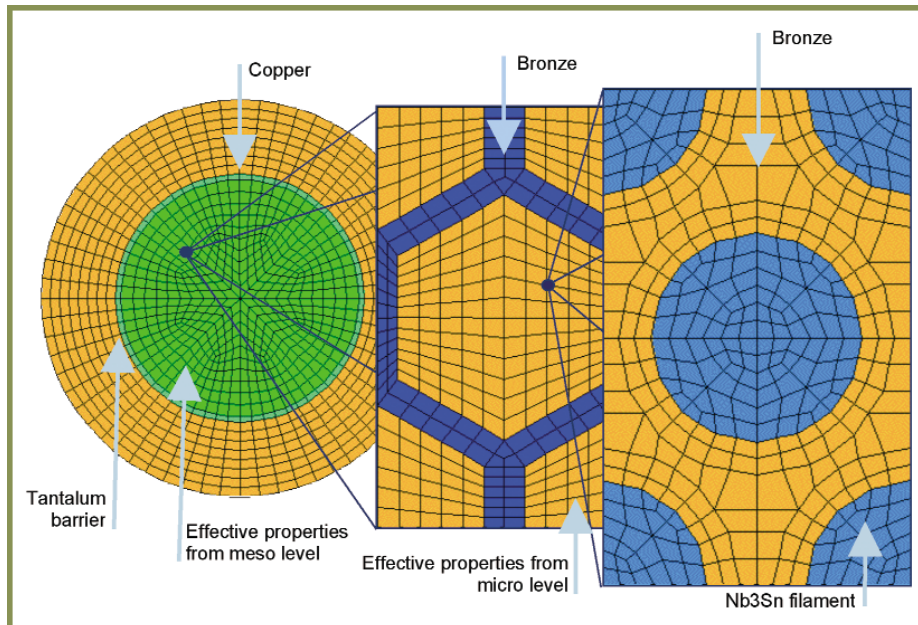


Fig. 16 – Modello del filo superconduttore a livello macro, meso e micro per l'omogeneizzazione non lineare.

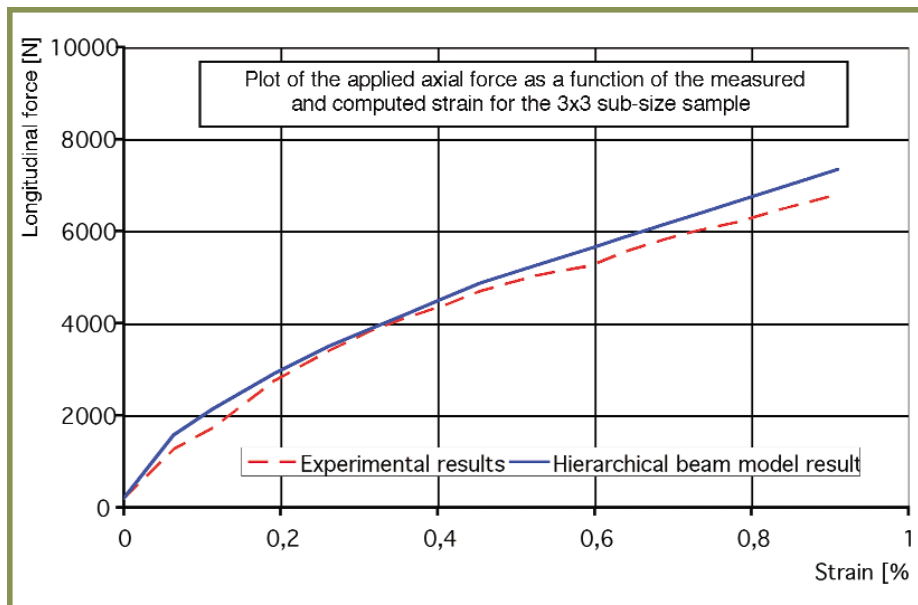


Fig. 17 – Confronto dei valori sperimentali e numerici della deformazione di un provino soggetto a forza assiale.

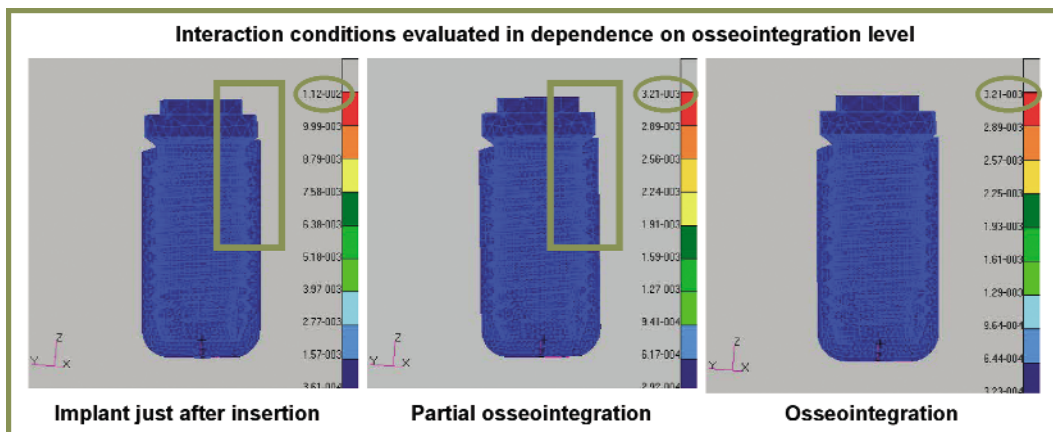
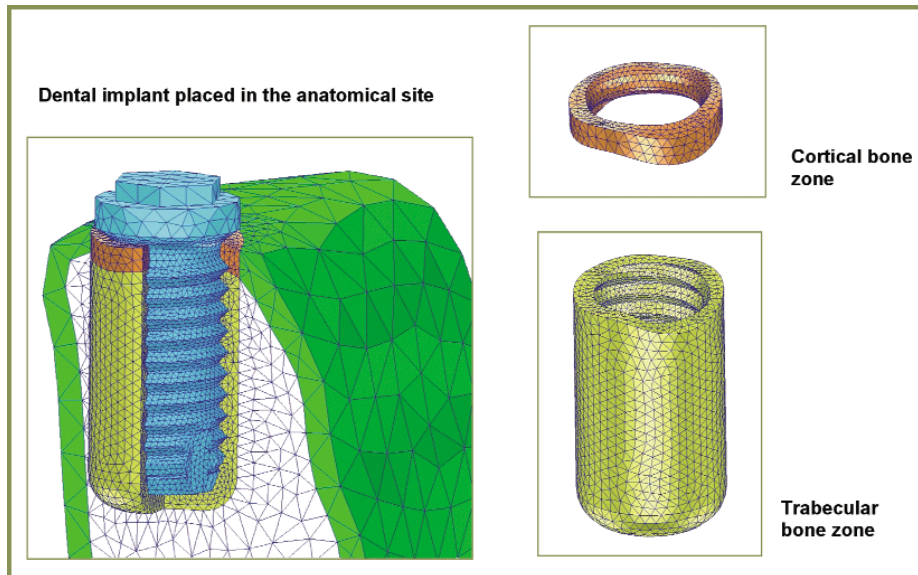


Fig. 18 – Meccanica dei tessuti duri; comportamento di un impianto protesico dentale (gentile concessione di A. Natali, Centro di Meccanica dei Materiali Biologici dell'Università di Padova).

Come ultima applicazione, nella Figura 19 è presentata la definizione di un modello di studio della circolazione sanguigna nel cuore secondo modelli avanzati di fluidodinamica nei vasi sanguigni, che sono interpretati come continui deformabili in grandi spostamenti, tenendo conto contemporaneamente delle nonlinearità tipiche dell'idraulica e della meccanica (Fig. 19).

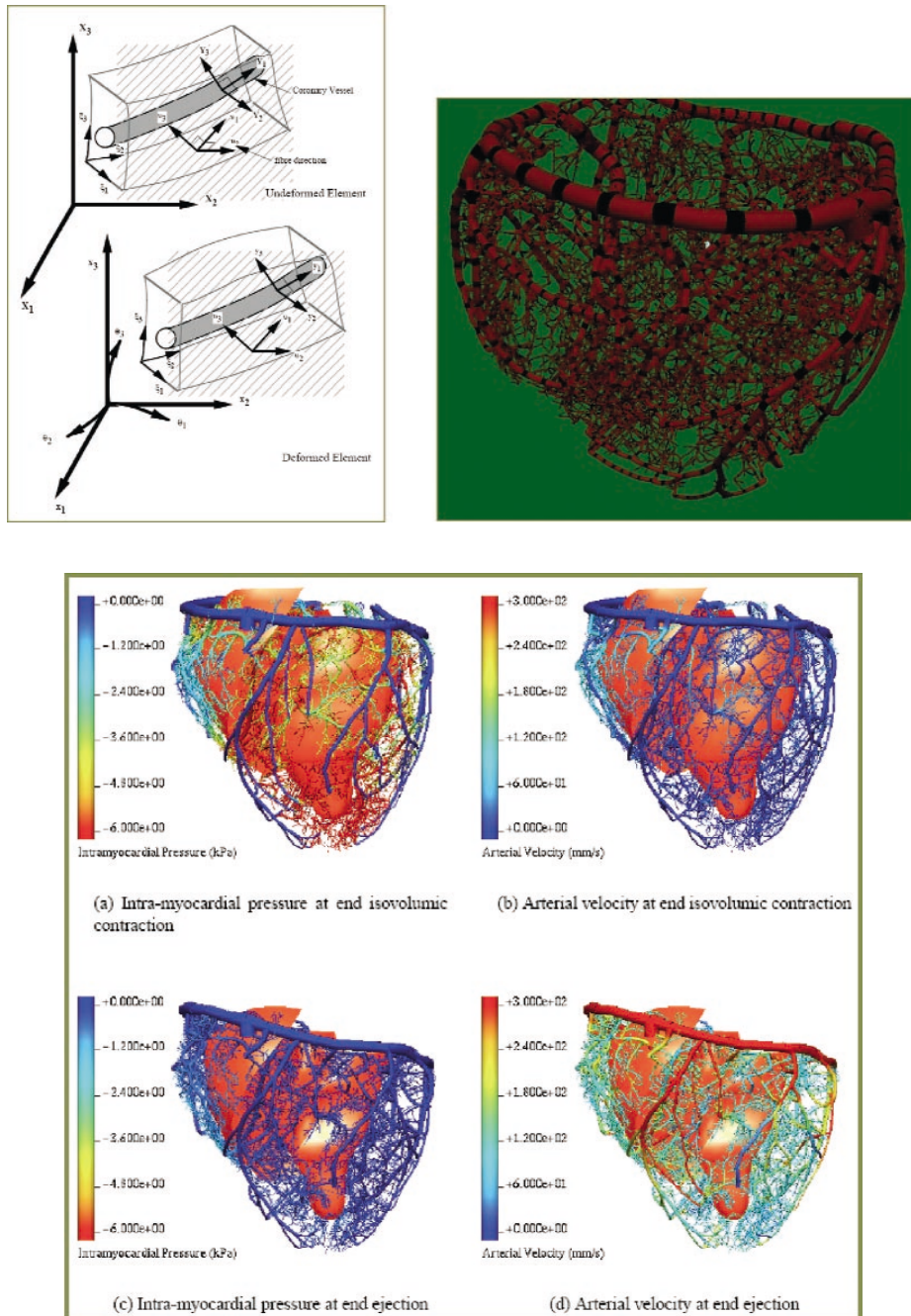


Fig. 19 – Meccanica dei tessuti molli: simulazione della circolazione sanguigna nel cuore (gentile concessione di P.J. Hunter, University of Auckland).

Al termine di questo excursus su problemi provenienti da campi nettamente distinti, ma accomunati dalla spiccata multidisciplinarietà dei temi trattati, vorrei fornire una possibile soluzione al problema posto inizialmente della valutazione di questo tipo di attività.

Per studiare correttamente temi multidisciplinari occorre essere esperto in almeno uno dei settori coinvolti e bisogna avere sufficiente cultura scientifica da poter collaborare in modo proficuo con gli esperti degli altri campi. Bisognerebbe quindi evitare di sfiorare in modo superficiale discipline diverse, correndo così il rischio di omettere aspetti importanti. Tutto ciò ha un'implicazione metodologica sulla valutazione, che diventa molto delicata: gli esaminatori dovrebbero avere una formazione scientifica con caratteristiche di multidisciplinarietà. Alcuni lavori poco approfonditi, ma pubblicati su riviste internazionali, dimostrano come la revisione di questo tipo di lavori sia cosa molto difficile.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare i componenti del mio gruppo di ricerca, Daniela Boso, Darius Gawin, Marek Lefik, Carmelo Maiorana, Francesco Pesavento, Valentina Salomoni, Lorenzo Sanavia, Stefano Secchi e in particolare Luciano Simoni. Ringrazio inoltre il Prof. Arturo Natali del Centro di Meccanica dei Materiali Biologici dell'Università di Padova e il Prof. Peter J. Hunter della University of Auckland per i loro contributi sui temi di biomeccanica.

Bibliografia

I temi accennati in questo scritto coprono campi assai disparati. Le fonti bibliografiche che seguono possono servire quale quadro metodologico per focalizzare formalismi matematici e computazionali dei problemi multidisciplinari.

- B.A. Schrefler, Multifield Problems, Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 2: Solids, Structures and Coupled Problems, E. Stein, R. de Borst, and T.J.R. Hughes, eds, J. Wiley & Sons, Chichester, 2004, 575-603.
- B.A. Schrefler, Multiscale modelling, Chapter 18 from The Finite Element Method for Solids and Structural Mechanics, 6th Edition O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, Elsevier Butterworth Heinemann, Amsterdam 2005, 547-589.
- R.W. Lewis, B.A. Schrefler, The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media, J. Wiley, Chichester, 1998.