

Meccanica delle Strutture

Introduzione al corso

AA 2013/2014

Ing. Elena Benvenuti

Programma del corso

1- Premesse

- **Richiami di teoria dell'elasticità.**
- **Introduzione ai metodi agli E.F.**

2- Problemi piani:

- **Pb. piani di tensione (lastre caricate nel piano, travi parete..)**
- **Pb. Piani di deformazione**
- **Pb. Assialsimmetrici**

Programma del corso

3- Lastre inflesse o piastre

- **Teorie di Love-Kirchhoff e di Reissner- Mindlin**
- **Elementi finiti di piastra (plate and shell)**

4-Lastre curve

- **Membrane curve (cupole)**
- **Lastre curve di rivoluzione (serbatoi, silos)**

Programma del corso

- 5 Comportamento dei materiali elastoplastici. Teoria della plasticità e leggi di flusso associate. Il postulato della dissipazione massima e i materiali elastoplastici standard. Ipotesi di comportamento rigido plastico. Il teorema statico ed il teorema cinematico dell'analisi limite.**
- 6 Il modello di cerniera plastica e la determinazione del moltiplicatore di collasso per i sistemi di trave. Analisi limite di problemi in stato piano di tensione e di deformazione.**

Programma del corso

- 7 Richiami della teoria della stabilità dell'equilibrio elastico. Instabilità flessione torsionale . Problemi euleriani e non. Instabilità di lastre caricate nel proprio piano.**
- 9 Interazione fra plasticità e stabilità dell' equilibrio: formula di Rankine-Merchant.**

Programma del corso

Obiettivi formativi: Conoscere e applicare modelli teorici relativi a continui bidimensionali, a superficie media piana e curva in regime membranale e flessionale.

Comprendere il comportamento delle strutture al di là dei carichi di esercizio; con riferimento principalmente a strutture metalliche essere in grado di valutare, sia manualmente che con l'utilizzo di programmi di calcolo, i moltiplicatori di collasso di strutture intelaiate e bidimensionali ed inoltre essere in grado di valutare i carichi critici Euleriani di travi e strutture intelaiate.

Prerequisiti: Conoscenze di base dell'analisi differenziale e della scienza delle costruzioni

Orari delle lezioni

Lezione

Martedì 8,30- 11

Mercoledì 8,30- 11

Giovedì' 8,30- 11

**In una di queste giornate che vi comunicherò si
effettueranno 2,5 ore di esercitazione al calcolatore**

Attrezzarsi con portatile, ciabatte e prese

Planner del corso

Dal 27 Febbraio al 16 Aprile 2014 compresi
e dal 28 APRILE al 5 Giugno 2014

Il 3 Giugno recupero lezioni perse del 1°
maggio, si segue l'orario del giovedì, il 4
Giugno recupero lezioni perse del 2 maggio,
si segue l'orario del venerdì, il 5 giugno.

Planner del corso

2014

Januar

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Februar

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28		

März

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

April

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30				

Mai

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Juni

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Juli

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

August

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Riferimenti bibliografici

1. **L.Corradi dall'Acqua , Meccanica delle strutture, vol.2 McGraw-Hill.**
2. **O. Belluzzi, Scienza delle Costruzioni, vol.3 Zanichelli**
3. **B. Szabo, I. Babuska , F.E. Analysis J. Wiley**
4. **K.J. Bathe , F.E. Procedures Prentice-Hall**
5. **P. Pozzati, C. Ceccoli “ Teoria e Tecnica delle Strutture” UTET**
6. **F. Leonhardt, E. Manning “ C.a& c.a.p. calcolo di progetto e tecniche costruttive“ vol. 1 ed. Scienza e Tecnica**
7. **S. Timoshenko, G. Woinosky-Krieger “Plate & shells” McGraw Hill**

Riferimenti bibliografici

- **L. Corradi dell' Acqua "Meccanica delle strutture", vol. III : La valutazione della capacità portante", McGraw-Hill, 1994.**

Capitolo 1: Analisi incrementale di strutture elasto-plastiche, pp. 1-35

Capitolo 2: Analisi limite di sistemi di travi, pp. 1-20

Capitolo 3: Analisi limite in presenza di sollecitazioni composte e stati di sollecitazione pluri-assiali, pp. 1-20

- **L. Gambarotta, L. Nunziante, A. Tralli " Scienza delle Costruzioni" , McGraw-Hill, 2003 (Capitolo 7: Resistenza e stabilità delle strutture, pp. 485-582)**

Riferimenti bibliografici

- **D. Ferretti, I. Iori, M. Morini “ La stabilità delle strutture : Il caso delle strutture in cemento armato”, McGraw-Hill, 2002 (Capitolo 4: L’analisi agli elementi finiti nell’instabilità delle strutture in c.a., pp. 127-189, Capitolo 5: Procedimenti risolutivi nell’analisi non lineare agli elementi finiti, pp. 193-229)**
- **-AA.VV. “Manuale dell’ Ingegneria civile, vol. II: Scienza delle costruzioni”,Zanichelli,2001.**
M. Capurso, F. Laudiero, A. Tralli “ Analisi limite delle strutture”
M. Como “ Stabilità dell’equilibrio”
-R. Baldacci, G. Ceradini, E. Giangreco “Plasticità” Italsider, vol Ila 1971.G. Ceradini “Parte I: Fondamenti generali”; M. Capurso “ Parte II: Elasto-plasticità delle strutture

ESAMI

L'esame consiste in:

1 una prova orale

**2 un'esercitazione al calcolatore di Meccanica
delle Strutture**

**3 un'esercitazione al calcolatore di Analisi non
Lineare**

Materiale didattico

Teoria: Slides in formato pdf da stampare prima della lezione e scaricabili al sito (vecchio link del corso precedente)

www.unife.it/ing/Im.civile/insegnamenti/meccanica-delle-strutture/materiale-didattico

ESAMI

Fisso appelli ufficiali + altri appelli su appuntamento per gruppi di persone in numero ≥ 2

Priorità a chi si deve laureare a breve

Scrivetemi per email elena.benvenuti@unife.it e ci mettiamo d'accordo

FAQs

- 1) Ho seguito il corso di Meccanica delle Strutture in precedenti AA, devo riseguire?:
No, l'esercitazione assegnata allora e' valida altrimenti ne assegnamo una nuova**
- 2) Si fanno esami durante il corso?
Sì su appuntamento**

METODO degli ELEMENTI FINITI

- Si separa un dominio in un insieme di sotto-domini chiamati elementi finiti e si ottiene una soluzione approssimata del problema
- Le tecniche FEM trovano applicazione in tutti i campi di interesse scientifico: matematica, fisica, chimica, ecologia, ingegneria,
- Ingegneria delle strutture, ingegneria spaziale, sismica, ingegneria meccanica, ingegneria dei materiali, ingegneria idraulica, bioingegneria, trasporti...

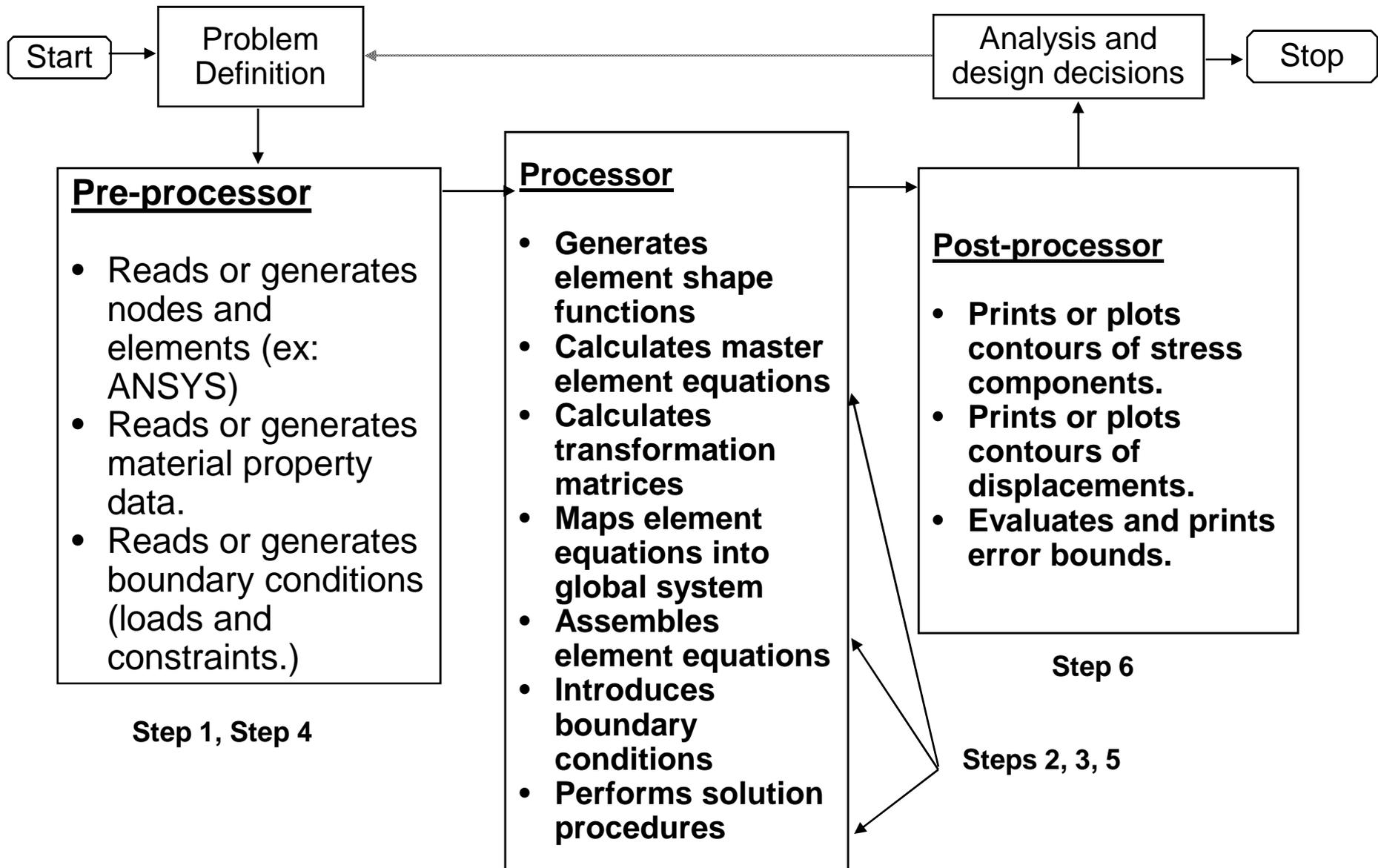
METODO degli ELEMENTI FINITI

- Stima di Π approssimando la circonferenza tramite il perimetro di poligoni...
- Tempi moderni: analisi strutturale di aerei (assemblaggio di lastre di acciaio...)
- 1941: Hrenikoff introduce il "framework method" in cui un mezzo elastico rappresentato come una collezione di aste e travi
- 1943: Courant, assemblaggio di triangoli e Principio Minimo EPT per solido St. Venant soggetto a torsione
- 1953: Analisi matriciale delle strutture (Levy, 1953; Argyris, 1954, 1955; Turner, Clough, Martin e Topp, 1956);
- 1960: Argyris, Kelsey, Energy Theorems and Structural Analysis;
- 1960: Clough: finite element;
- 1964: Livesly, Matrix method of Structural Analysis;
- 1968: Przemieniecki, Theory of Matrix Structural Analysis

METODO degli ELEMENTI FINITI

- Step 1 - Discretization: il dominio viene discretizzato in una collezione di forme semplici, detti elementi
- Step 2 - Equazioni del problema: espresse in funzione delle variabili nodali dell'elemento mediante principi variazionali
- Step 3 - Assemblaggio: le equazioni relative ad ogni elemento sono assemblate in un insieme di equazioni globali che modellano le proprietà dell'intero sistema.
- Step 4 - Applicazione delle condizioni al contorno: riflettono i valori noti delle variabili primarie, modificano le equazioni globali
- Step 5 - Soluzione: le equazioni globali sono risolte in termini delle variabili nodali.
- Step 6 - Calcolo delle variabili derivate (stress ed azioni interne) usando i valori nodali delle variabili primarie

Diagramma di flusso di una codice FEM



METODO degli ELEMENTI FINITI

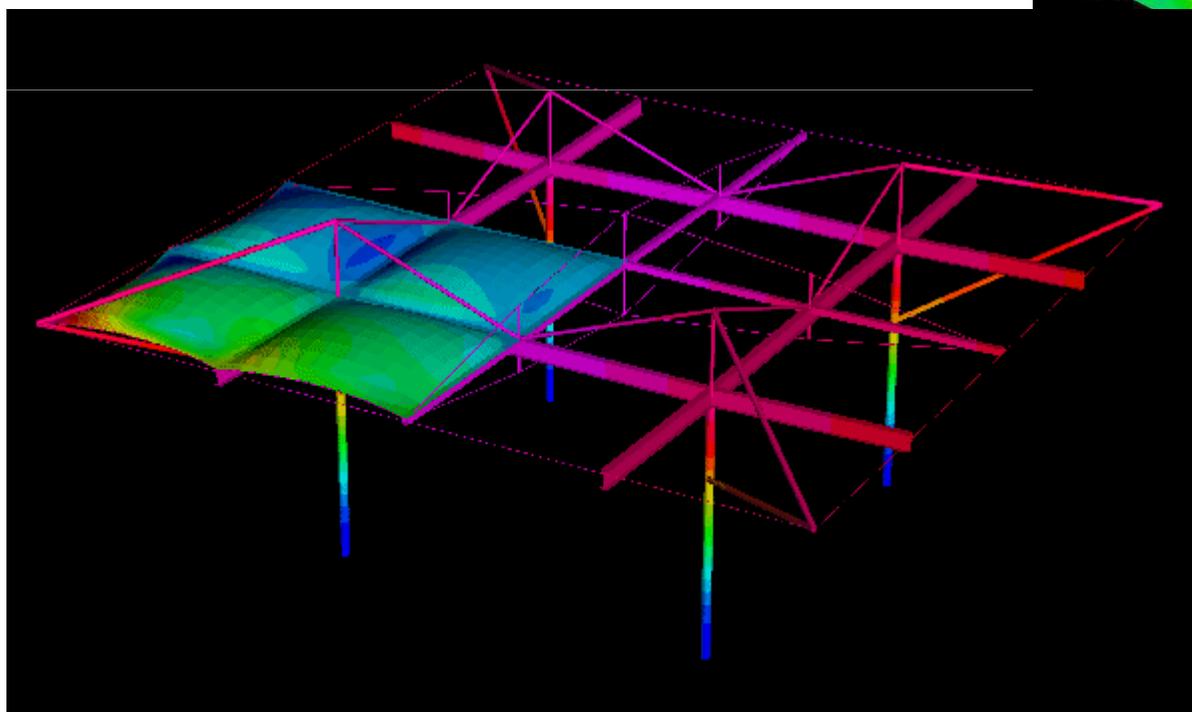
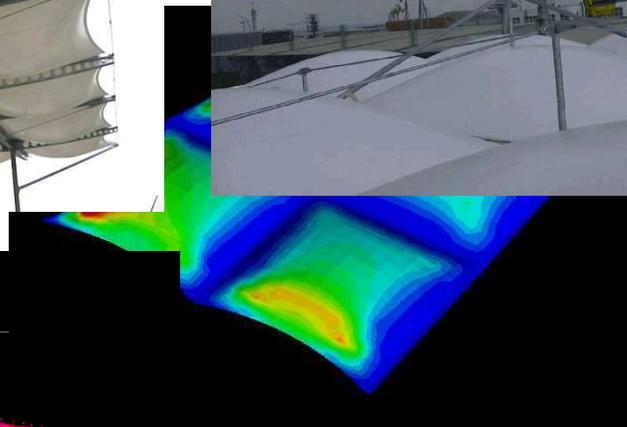
- General purpose programs
- Wilson, Berkeley, California: SAP, SAPIV, SAP80, SAP90, SUPERSAP, SAP2000
- Argyris, Stoccarda, Germania: NASTRAN
- Bersafe, Inghilterra: NAFEM

- ADINA, ABAQUS, ANSYS, STRAUS7.....

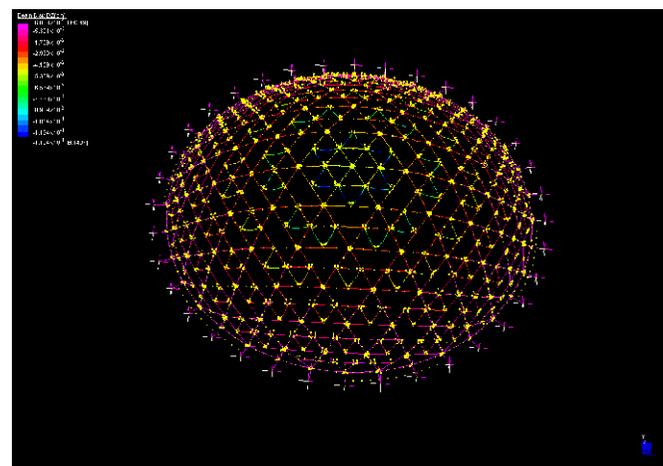
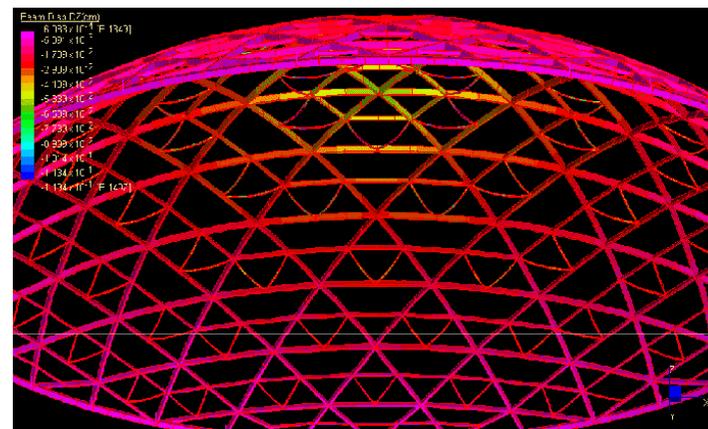
METODO degli ELEMENTI FINITI

A COSA SERVONO?

Progetto della copertura - membrana e struttura metallica - per lo Skyliner dell'EXPO 2000 di Hannover



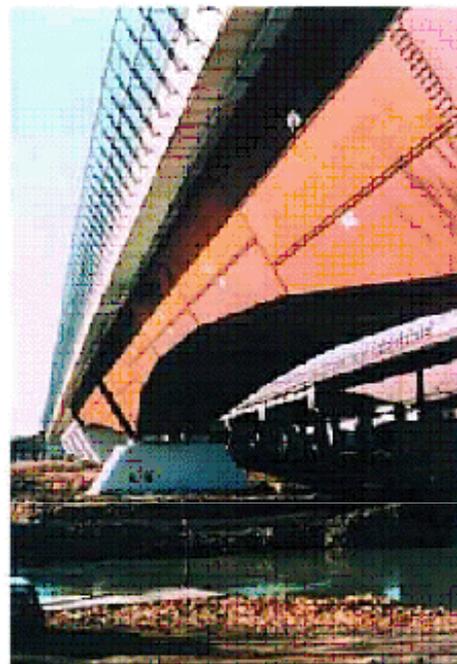
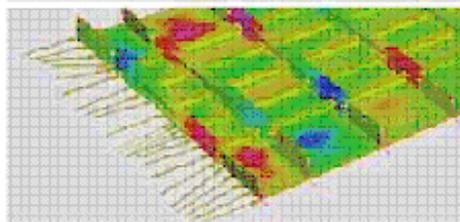
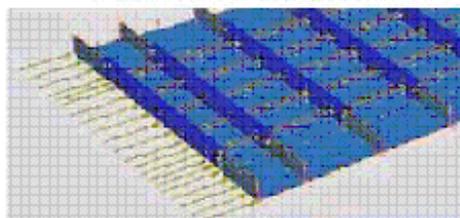
Copertura in legno lamellare del Palazzetto dello Sport di Trieste



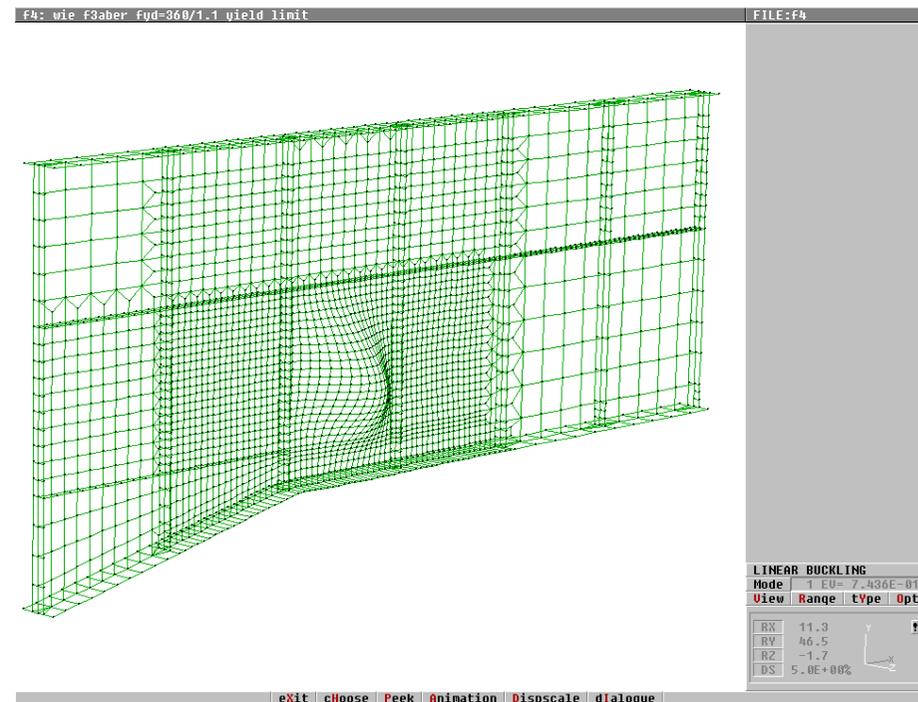
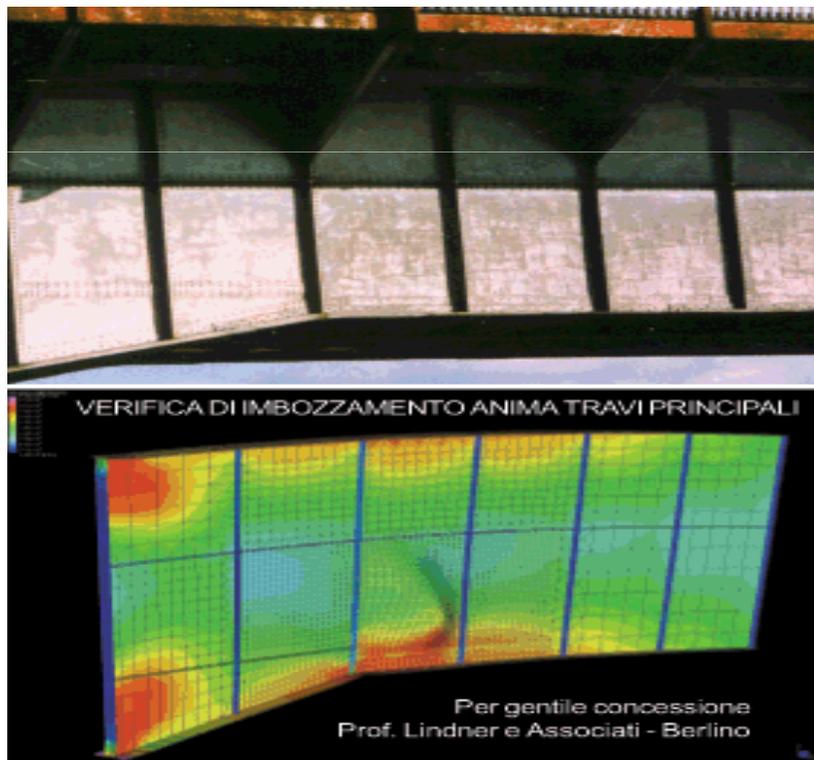
NUOVO PONTE SUL TEVERE PER IL GRANDE RACCORDO ANULARE IN ROMA

Ponte a struttura mista acciaio-calcestruzzo, strutturalmente continuo su tre luci rispettivamente di 67m, 102m e 67m; la larghezza complessiva è di 17,70m. Il ponte ha sezione scatolare chiusa ad altezza variabile da circa 6m (appoggi) a 3m (mezzetta); il cassone metallico ha anima inclinata, con interspazi in sommità di 12,70m che richiede l'introduzione di un rampante intermedio longitudinale per la soletta, sostenuto dalla diaframmatura reticolare. Modello FEM in Struas7; per rendere più rapidi i tempi di prelievazione in officina e di montaggio in cantiere, il progetto fa esteso ricorso a giunzioni bullonate. In particolare, solo parte degli irrigidimenti di controsoletta sono saldati, mentre quelli trasversali sono bullonati e non direttamente connessi alle plattabande; tale soluzione, non compresa fra le configurazioni trattabili con gli usuali metodi di verifica di stabilità, ha richiesto un'analisi di buckling lineare su una porzione significativa di soletta, dettagliatamente modellata; progetto costruttivo e dell'ing. Mario Organte (Padova, all'epoca presso ICESI); le modellazioni numeriche sono dell'ing. Roberto Zanon (ICES Padova). L'opera è stata realizzata dal Consorzio GRA Roma (Geppo-Salc - Giustino); le carpenterie metalliche sono state realizzate da OMDA (Vicenza).

www.campielo.it/HSH



II PONTE FLUGELWEG SULL'ELBA A DRESDA





LA TORRE DI RENZO PIANO

IN COSTRUZIONE A SYDNEY

a cura di
Piergiorgio Pirin

Renzo Piano è l'architetto che ha progettato la torre di 200 metri di altezza, in fase di avanzata costruzione a Sydney, in numero 88 di Phillip Street, angolo Macquarie Street. Il progetto deriva da una joint venture tra Lend Lease, ed un gruppo est asiatico di sede a Hong Kong. L'opera, che ha un valore stimato di 530 milioni di dollari, dovrebbe essere completata entro l'agosto del 2000. Nell'edificio sono riconoscibili molte delle caratteristiche proprie dello stile di Renzo Piano: esse sono però espresse non in maniera assuita e legata dal contesto architettonico urbano, ma "dialogano" anzi in maniera efficace ed evidente con la vicina Opera House e con il parco (Figura 1).

statico, che di azioni di tipo dinamico, tenuto conto della forma del tutto particolare della struttura stessa. Le condizioni di carico sono state generate come combinazioni di carichi di riferimento, sia relativi ad azioni permanenti, che ad azioni accidentali, con particolare riguardo ad azioni orizzontali quali il carico vento ed il sisma. Per quanto attiene alle analisi della risposta statica, le combinazioni di carico, scelte in accordo a quanto stabilito dalla normativa australiana, sono state in numero e di tipo adeguato a formulare una previsione realistica della risposta della struttura, con attenzione particolare ai carichi trasversali, ed ai carichi verticali eccentrici. La risposta dinamica della struttura, sia in

Dal punto di vista strutturale l'edificio è un telaio in calcestruzzo armato, costituito da un nucleo centrale e da solai tessuti tra questo ed i pilastri perimetrali. Il nucleo centrale ha sezione a forma di losanga. Un aspetto innovativo del progetto è legato all'incremento delle dimensioni in pianta dei solai con l'altezza, cosicché l'edificio dà l'impressione di inclinarsi in avanti (Figura 2). La sezione del nucleo centrale ha dimensioni massime, in pianta, di 40 metri per 9,5 metri. Il perimetro dei piani segue la curvatura delle pareti del nucleo centrale. I pilastri costituiscono un telaio perimetrale, caratterizzato da travi di bordo presenti a ciascun piano. Le piastre che costituiscono i solai sono disposte tra il nucleo centrale e le travi di bordo esterne, esse sono realizzate in calcestruzzo armato e sono rinforzate da travi piatte disposte in senso "radiale" e precomprese con cavi postesi. La sagoma geometrica di queste travi, alle loro estremità è concepita per ospitare i collegamenti degli impianti.

Il gruppo di progettazione della Lend Lease ha impiegato il codice strutturale STRAUS per svolgere l'analisi della risposta statica e dinamica della torre.

FINALITÀ DEL CALCOLO

È stata svolta un'analisi rigorosa della torre, in conformità a quanto previsto dal punto 7.8 della norma AS 3600 (Figura 3 e 4). Nell'analisi è tenuto conto delle proprietà dei materiali, degli effetti geometrici degli effetti dovuti alla tridimensionalità della struttura, e dell'interazione suolo-struttura. L'obiettivo principale del calcolo è stato quello di riprodurre in modo realistico il comportamento della struttura, sia nei confronti di diverse azioni di tipo

mutatamente alle sue frequenze e forme modali naturali, che relativamente alle azioni sismiche, è pure stata valutata con l'attenzione dovuta. Gli aspetti legati alla stabilità dell'equilibrio sono stati indagati attraverso opportuni modelli risolti secondo l'approccio del buckling lineare, e sintetizzati anche in forma di lunghezze libere di inflessione e snellezze degli elementi strutturali interessati.

IL MODELLO

Il modello ad elementi finiti della torre è stato messo a punto attraverso una procedura sequenziale. A tenore conto della forma particolarmente complessa della torre, la geometria è stata direttamente importata dal modello CAD della stessa. È stata poi sviluppata la suddivisione in elementi finiti cercando soluzioni che fossero ottimali sia dal punto di vista numerico e da quello pratico-operativo. In particolare, ad esempio, gli elementi piastra utilizzati per schematizzare i solai, sono stati trattati con scalatura attenta, e distinguendo, per ogni piano, ben cinque famiglie di informazioni geometriche distinte, che consentissero di adattare le rigidità all'effettiva geometria locale (tenendo conto, quindi dell'aumento di spessore della soletta verso il nucleo centrale, della forma all'estremità delle travi piatte, ecc.). A questo fine risulta anche di particolare utilità la funzione di STRAUS che consente di specializzare, per ciascun elemento guscio ("plate") lo spessore da associare al comportamento membranale e quello da associare al comportamento a lastra inflessa. I carichi permanenti sono

Analisi della risposta statica e dinamica svolta con il codice di calcolo ad elementi finiti STRAUS

stati gestiti operando con coefficienti moltiplicativi a partire da valori assegnati come densità del materiale. Le azioni variabili sono state assegnate come carichi di pressione applicate alle facce degli elementi guscio. Le travi perimetrali sono state schematizzate utilizzando elementi monodimensionali (tipo "beam"). La facciata dell'edificio è stata schematizzata mediante elementi guscio, ed il carico vento applicato come pressione agente sulle facce di tali elementi.

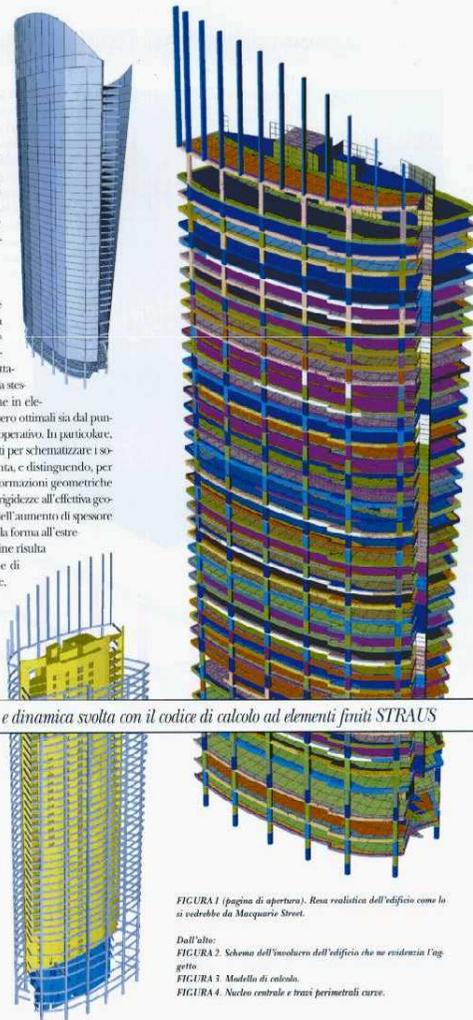
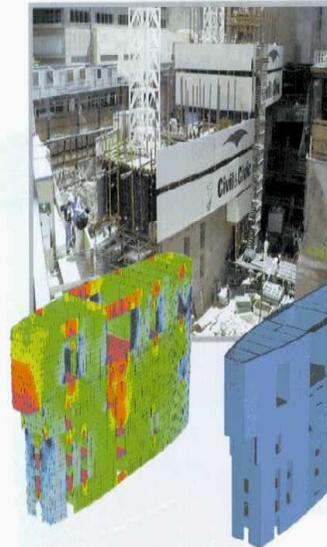


FIGURA 1 (pagina di apertura). Rota realistica dell'edificio come lo si vedrebbe da Macquarie Street.

Dall'alto:
FIGURA 2. Schema dell'insediamento dell'edificio che ne evidenzia l'angolo.
FIGURA 3. Modello di calcolo.
FIGURA 4. Nucleo centrale e travi perimetrali curve.



ANALISI SVOLTE

Sono stati utilizzati i solutori Linear Static, Natural Frequency e Linear Buckling del codice STRAUS. Per riferire di alcuni dettagli del calcolo, si precisa che l'analisi della risposta statica è stata fatta precedere da studi di sensitività, sia locali che complessivi, per accertare che le proprietà assegnate ai materiali (intese sia come proprietà meccaniche, che come proprietà di tipo geometrico degli elementi finiti) ben riflettevano il comportamento di componenti strutturali di geometria variabile e variamente collegati tra loro, per i quali non fosse possibile (o convenientemente) giungere ad un dettaglio di modello (suddivisione in elementi finiti) più spinto.

È stato poi fatto uso della funzionalità di "submodelling" presente in STRAUS, per studiare in maggior dettaglio comportamenti locali in zone ritenute critiche (Figura 5, 6, a, b). La funzione di "submodelling" consente di utilizzare suddivisioni più fini nelle zone che si vogliono indagare con maggior dettaglio, trasferendo auto-

maticamente, come condizioni al contorno del modello locale di dettaglio, le azioni a questo trasmesse e determinate sul modello complessivo dell'intera struttura.

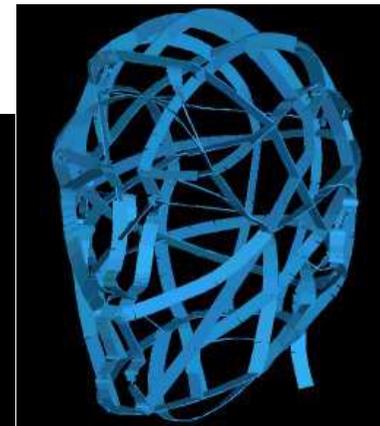
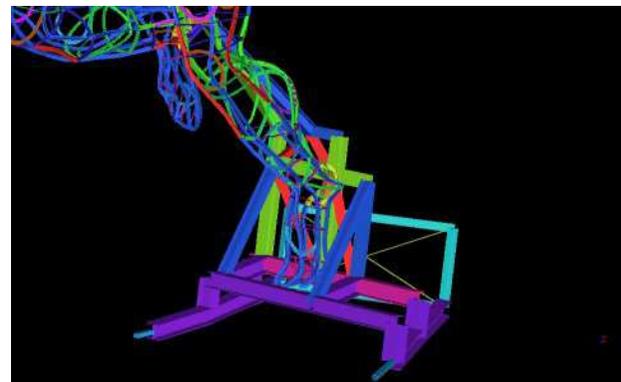
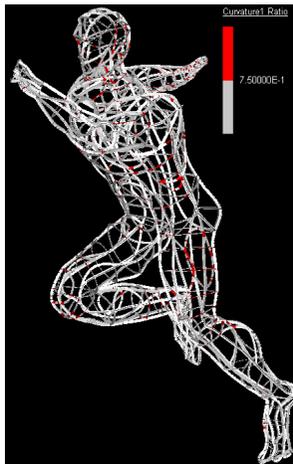
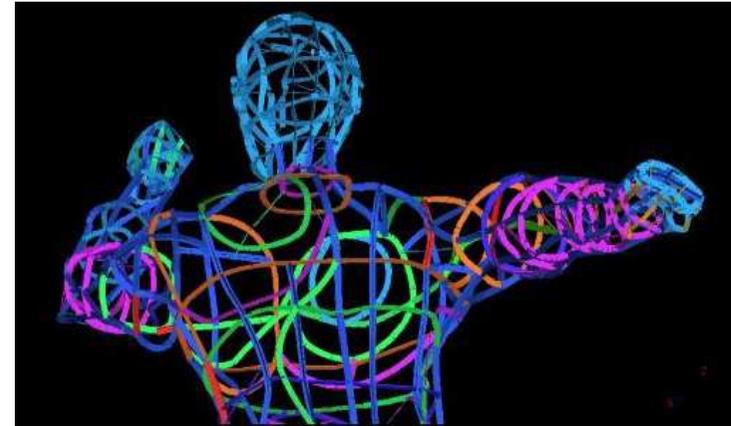
Tra i risultati di sintesi, è stato valutato come le forze trasversali si ripartiscono tra il nucleo centrale e la struttura inelastica circostante (Figura 7).

Per quanto attiene all'analisi della risposta dinamica, si riferisce che anche essa è stata fatta precedere da studi di sensitività, per caratterizzare in modo corretto sia la distribuzione delle masse, che le costanti elastiche "statiche" e "dinamiche" da attribuire ai diversi materiali presenti nel modello.

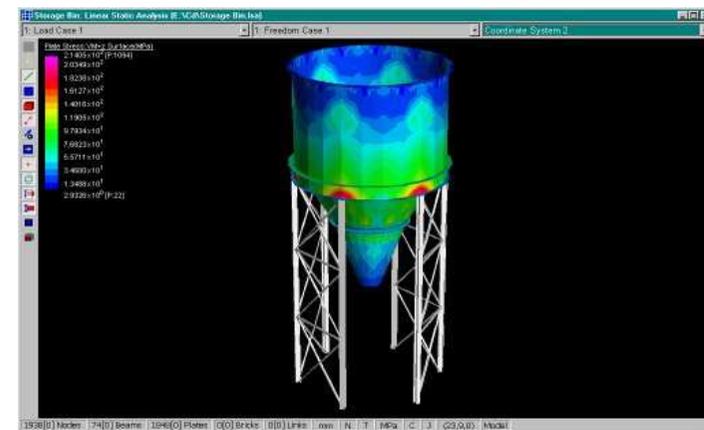
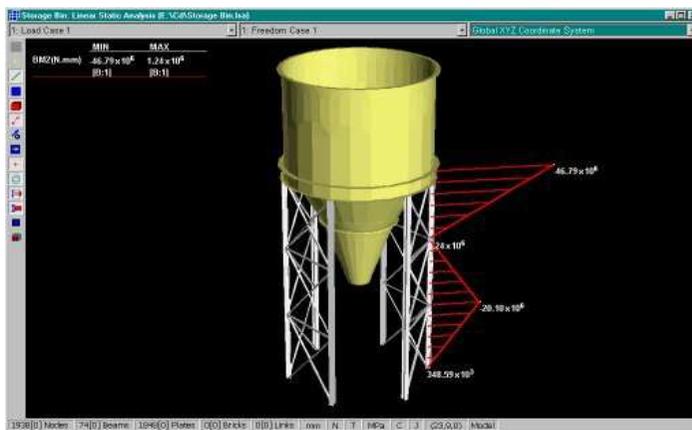
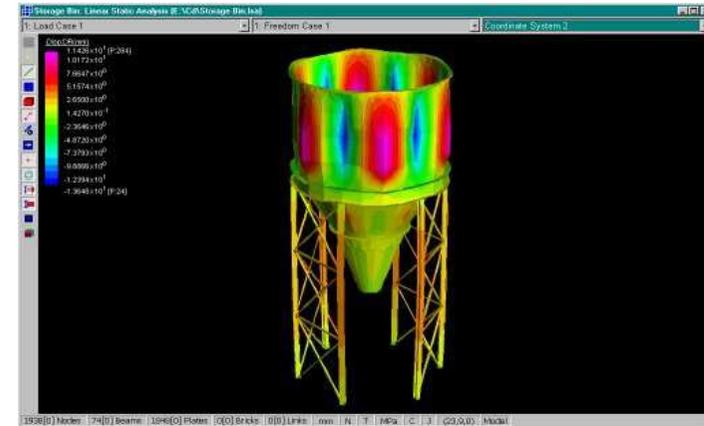
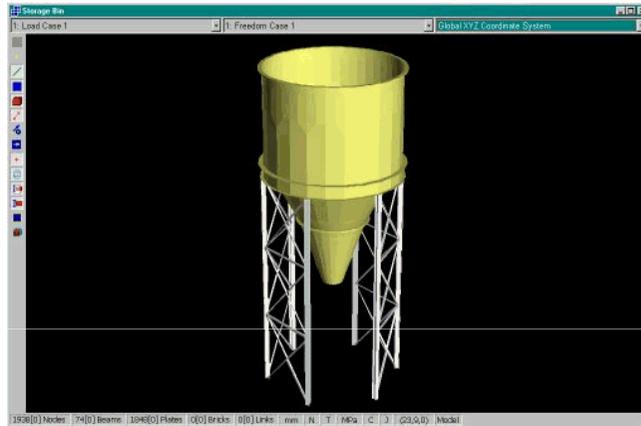
Per ulteriori informazioni sul codice di calcolo STRAUS contattare HSH srl, tel. 049/663888, fax 049/8758747, email hsh@perv.it, http://www.campielo.it/HSH

FIGURA 5 (foto in alto). Fondazione della torre in fase di costruzione. FIGURA 6, a, b (modelli). La funzionalità di "submodelling" consente di analizzare con maggior dettaglio locale le zone critiche. FIGURA 7 (nota). Stato tensionale rappresentato sulle travi in una tridimensionalità.

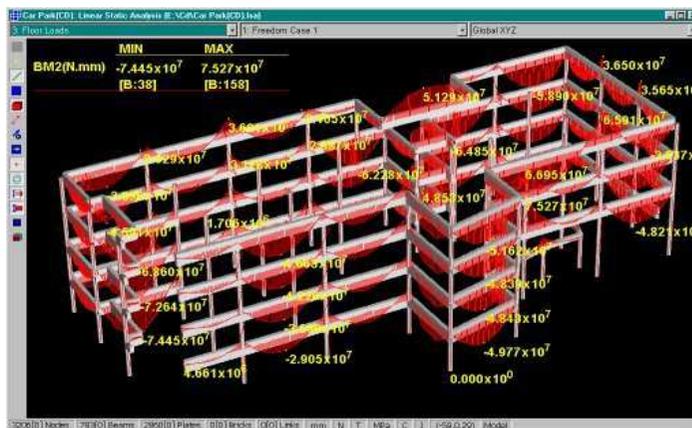
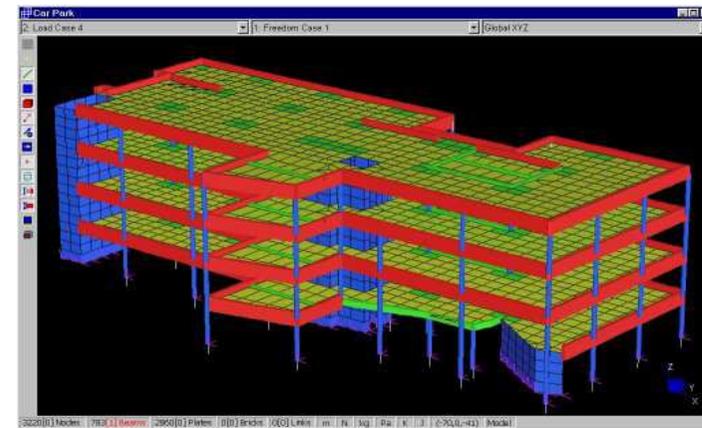
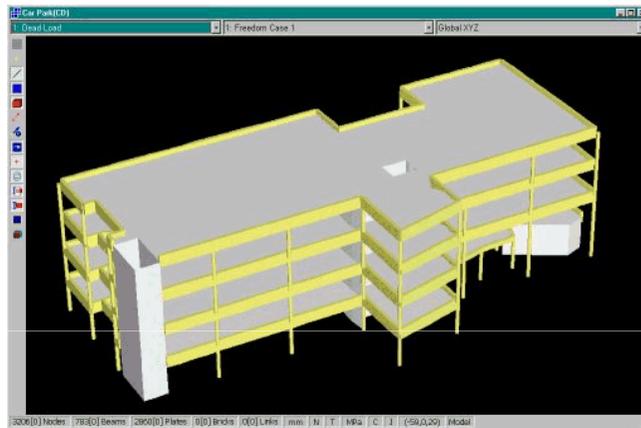
Statue olimpiche della AMP Tower di Sydney



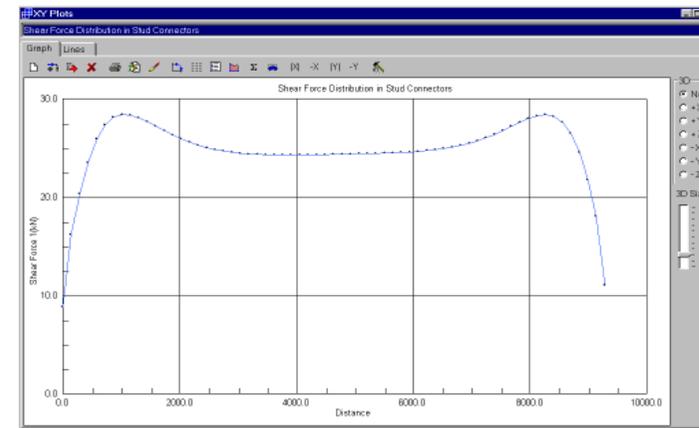
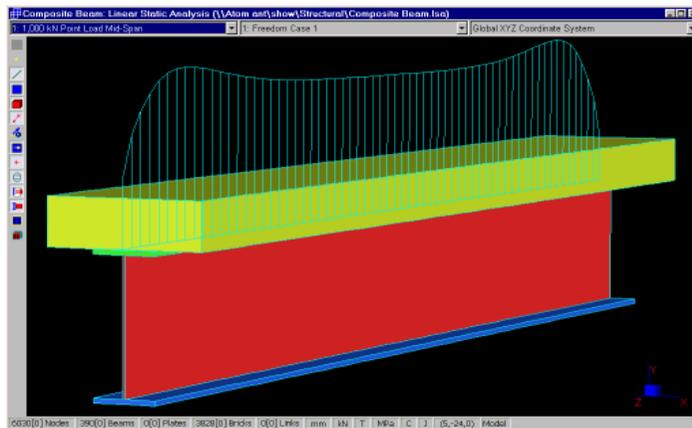
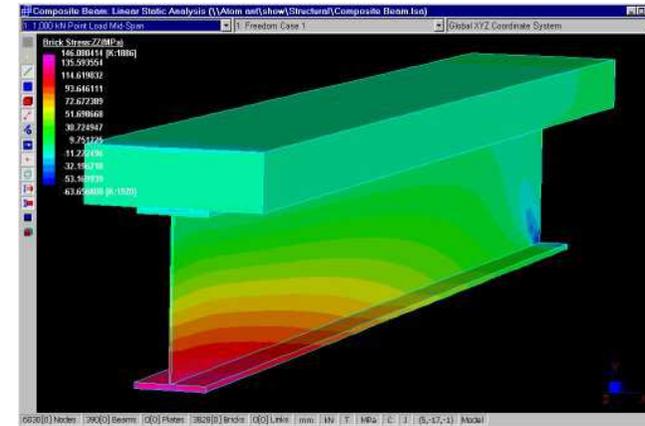
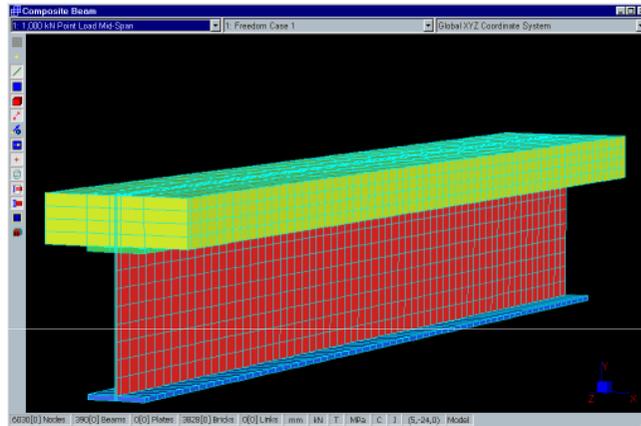
Modello di silo con elementi plate/shell



Parcheggio multipiano

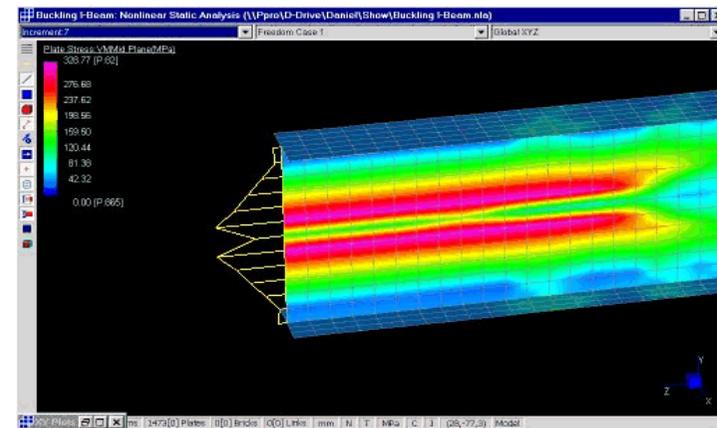
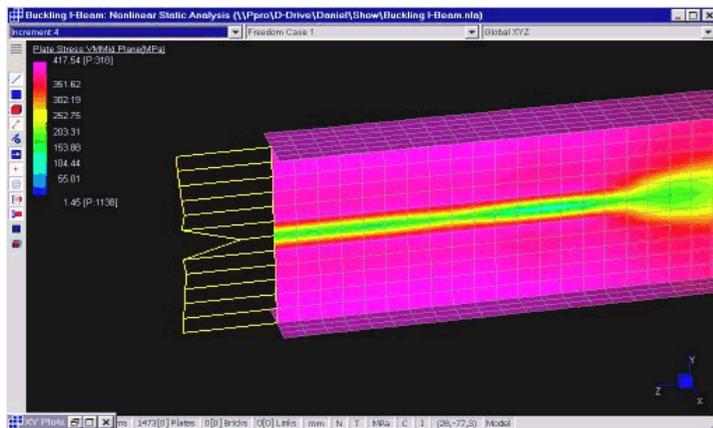
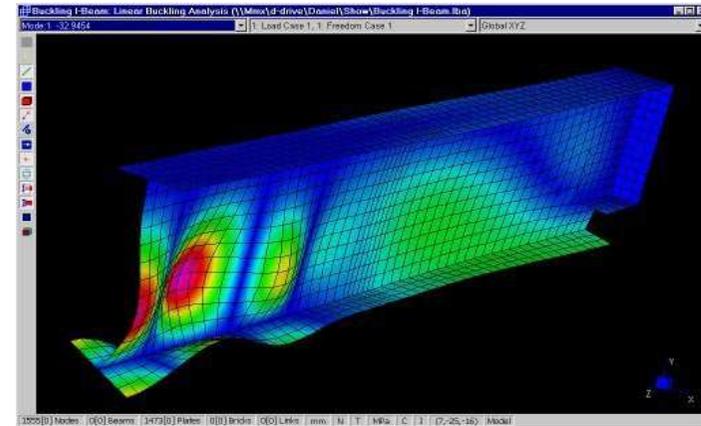
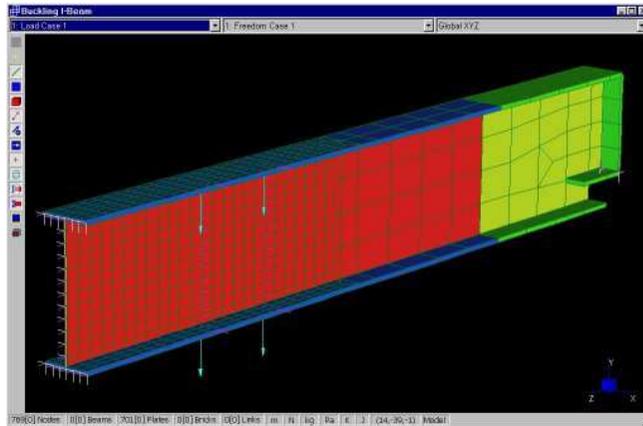


Trave a sezione mista

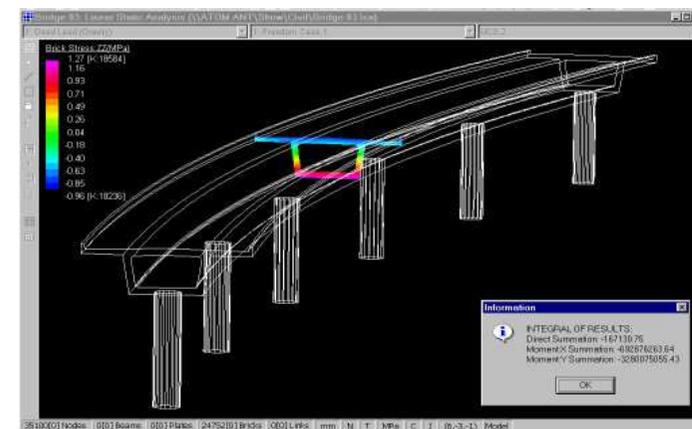
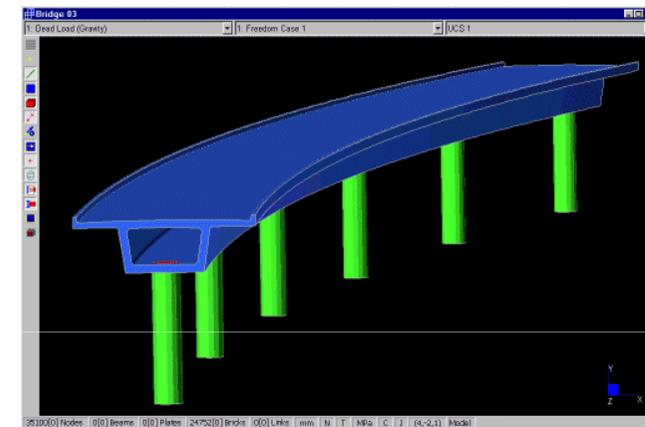
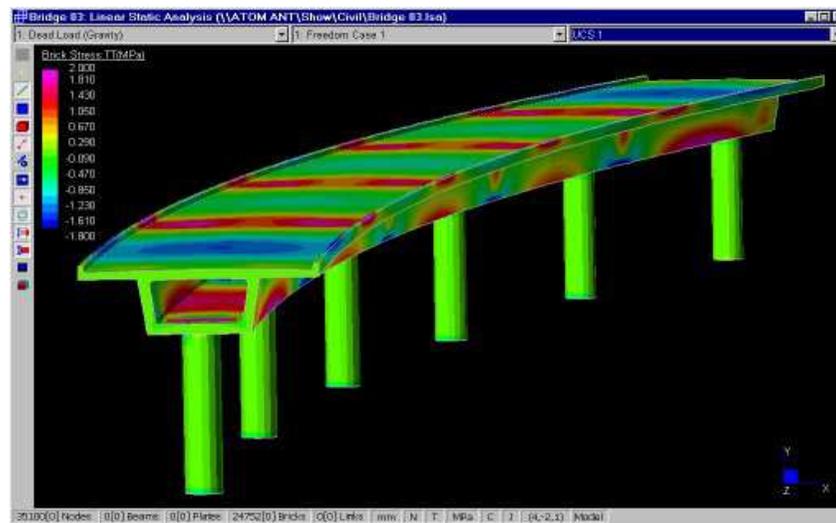


Instabilita' di profili

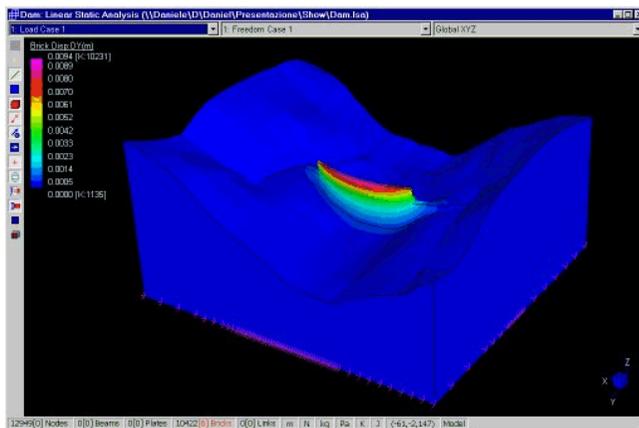
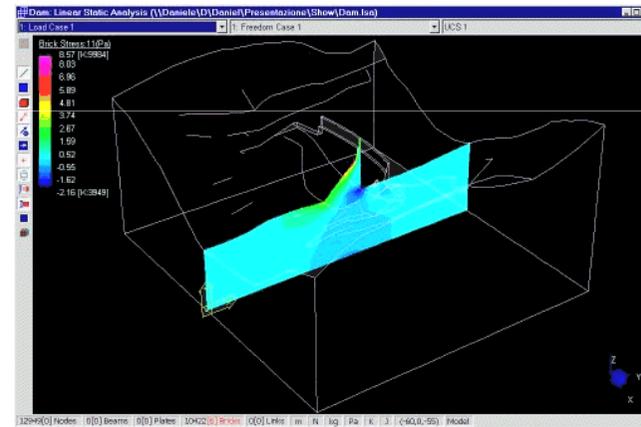
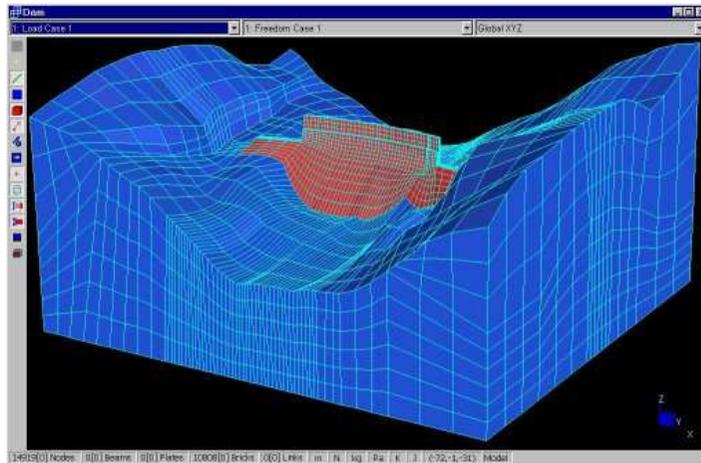
Modello plate/shell di una trave ad I



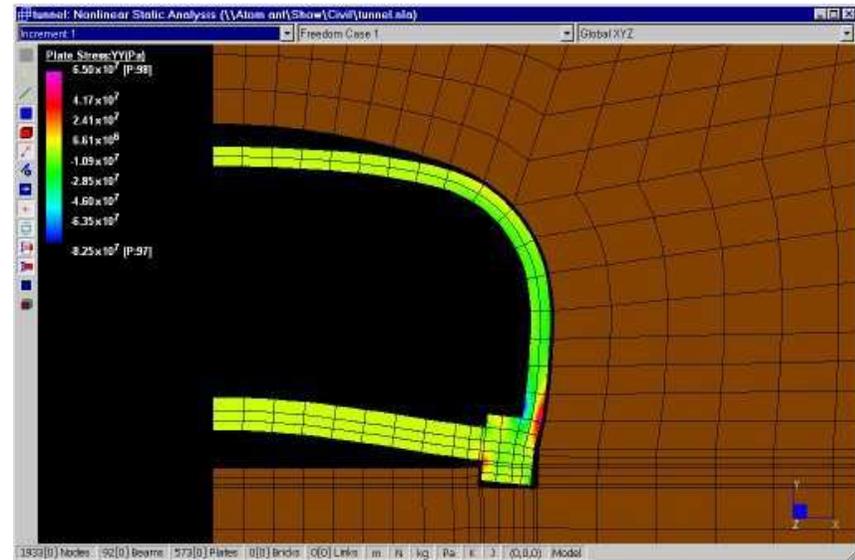
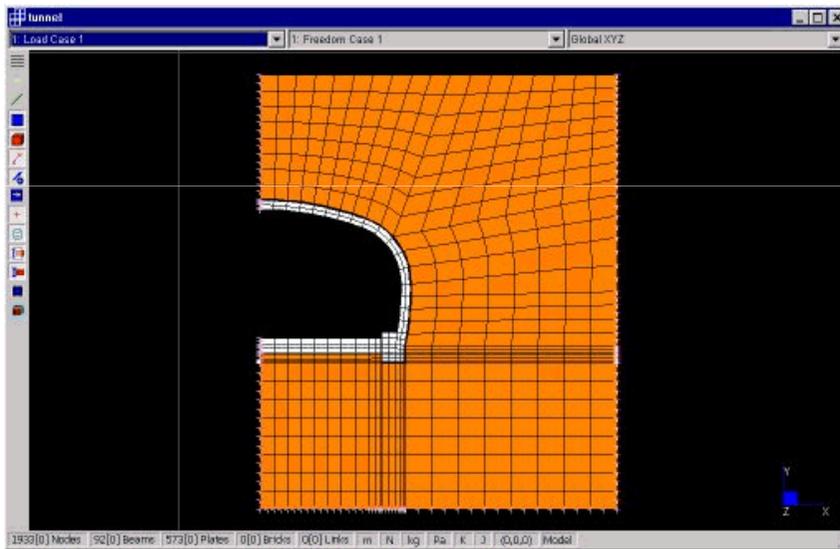
Viadotto autostradale



Diga ad arco in calcestruzzo



Tunnel di metropolitana in calcestruzzo

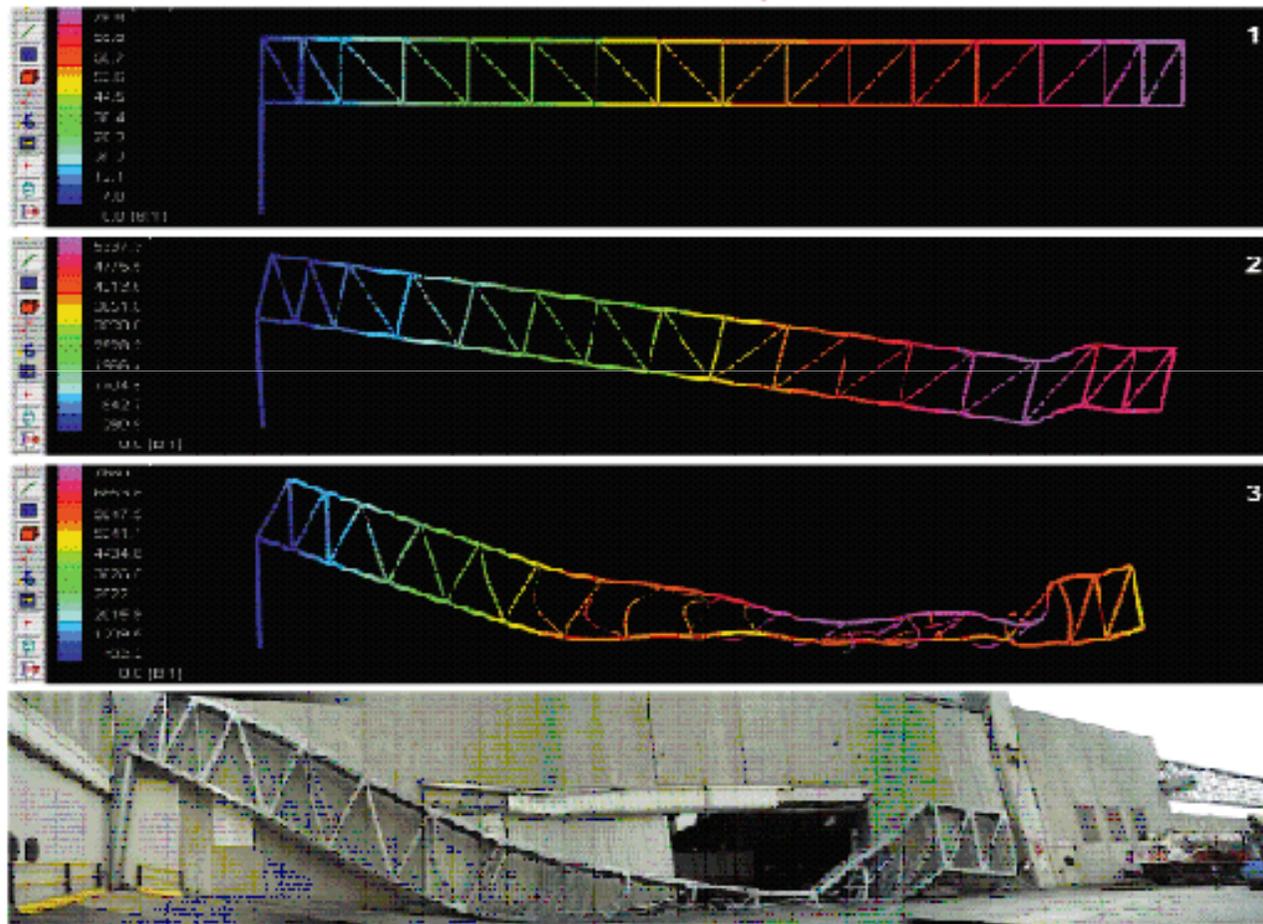


APPLICAZIONI AVANZATE - ANALISI DI UN CROLLO

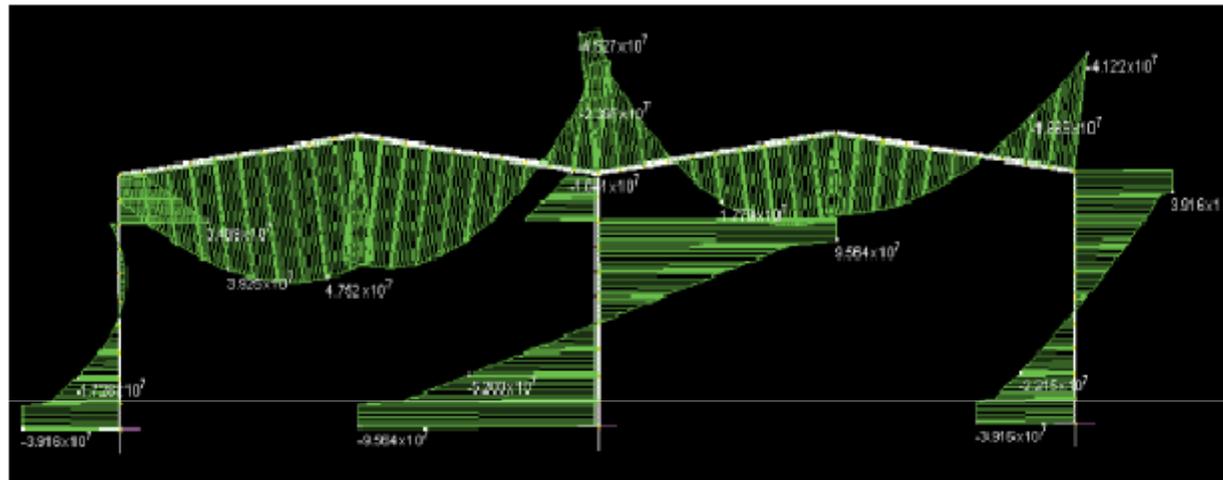
Simulazione del cedimento della mensola di appoggio di una trave reticolare con conseguente crollo della struttura. Risultati dell'analisi dinamica al passo non-lineare per geometria e materiale:

1) configurazione iniziale ($t=0.10$ s); 2) configurazione all'istante $t=1.10$ s; 3) configurazione finale ($t=1.78$ s).

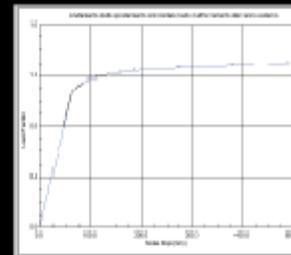
CD a richiesta - www.campiello.it/HSH



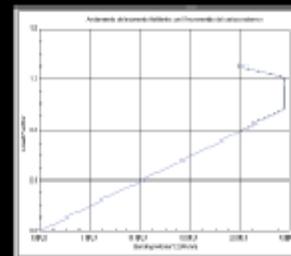
RISPOSTA NON-LINEARE GENERALIZZATA DI TELAI IN ACCIAIO



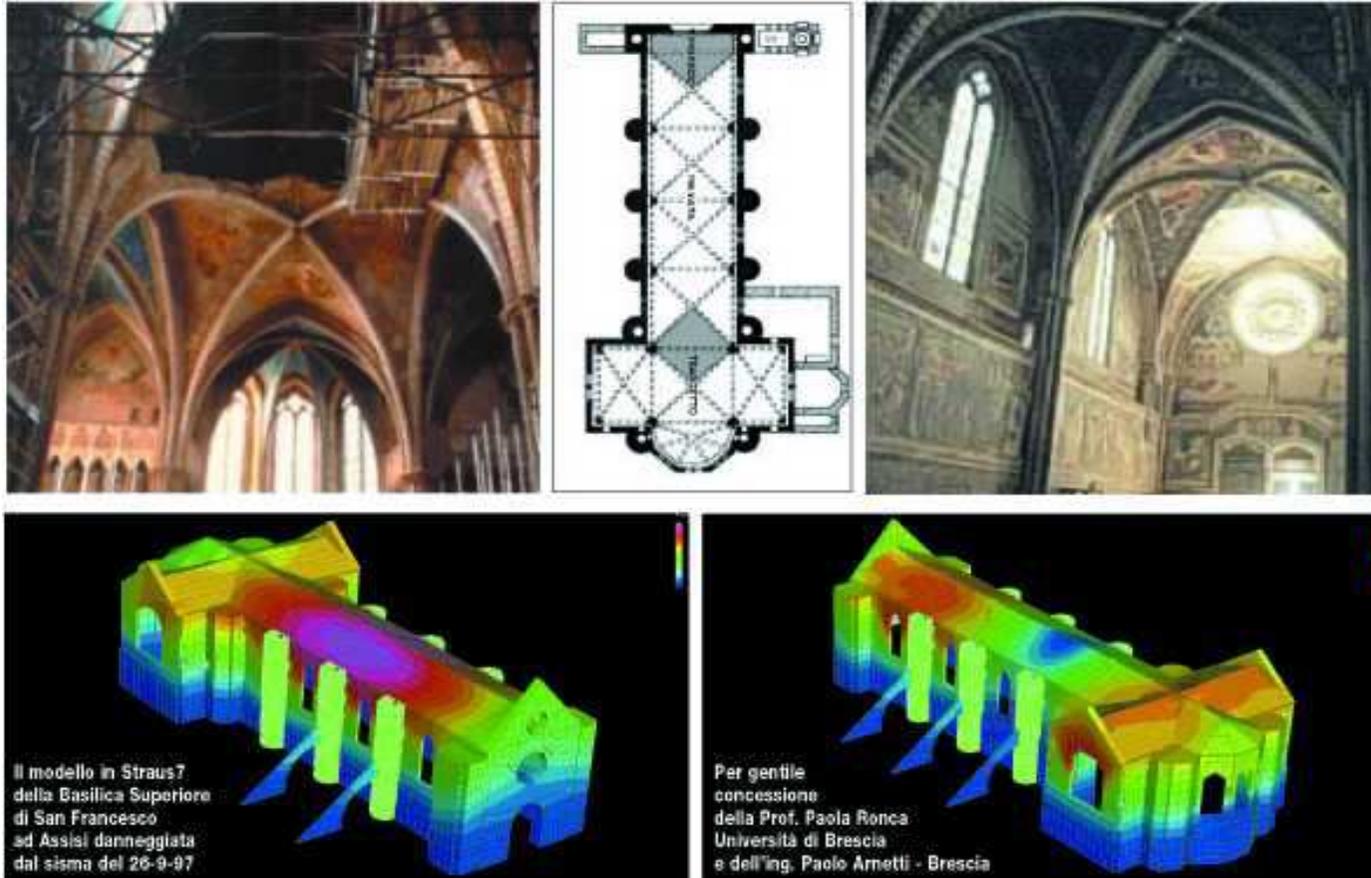
Benchmark di
analisi elasto-plastica
secondo **EURODICE 3**



La sequenza animata
della progressione del collasso
è in Internet in www.campiello.it/HSB

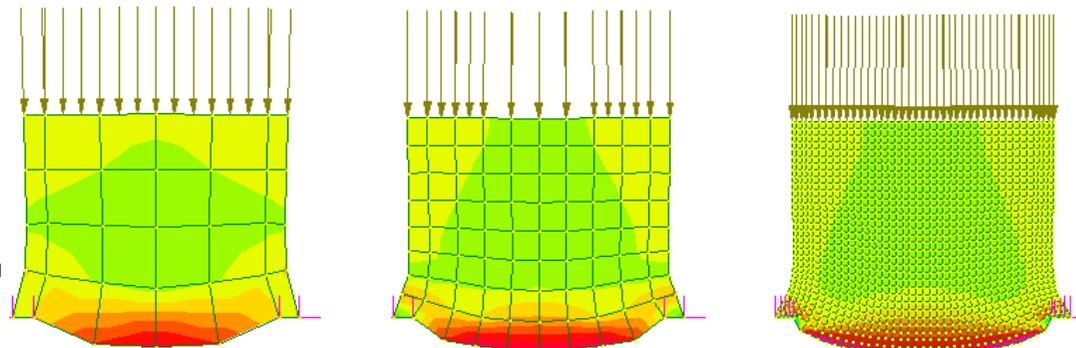
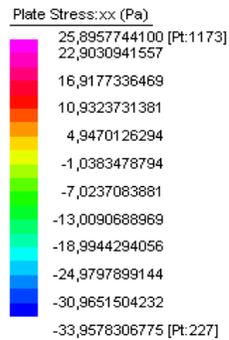
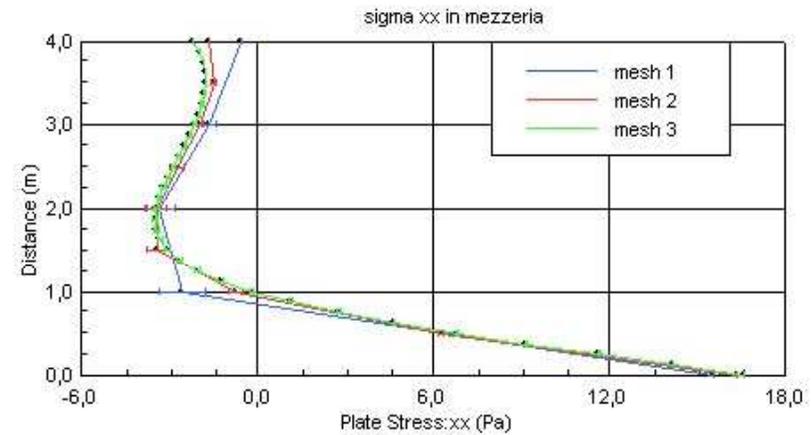
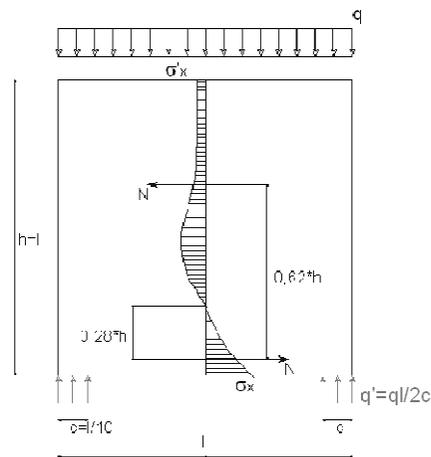
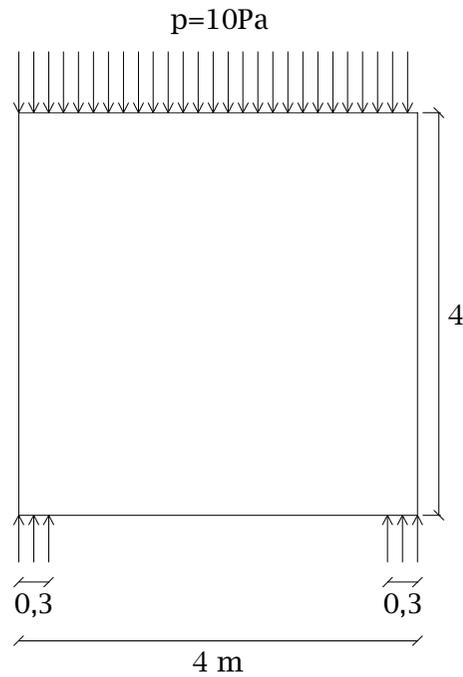


Interventi su edifici storici: Basilica di Assisi



Problemi piani

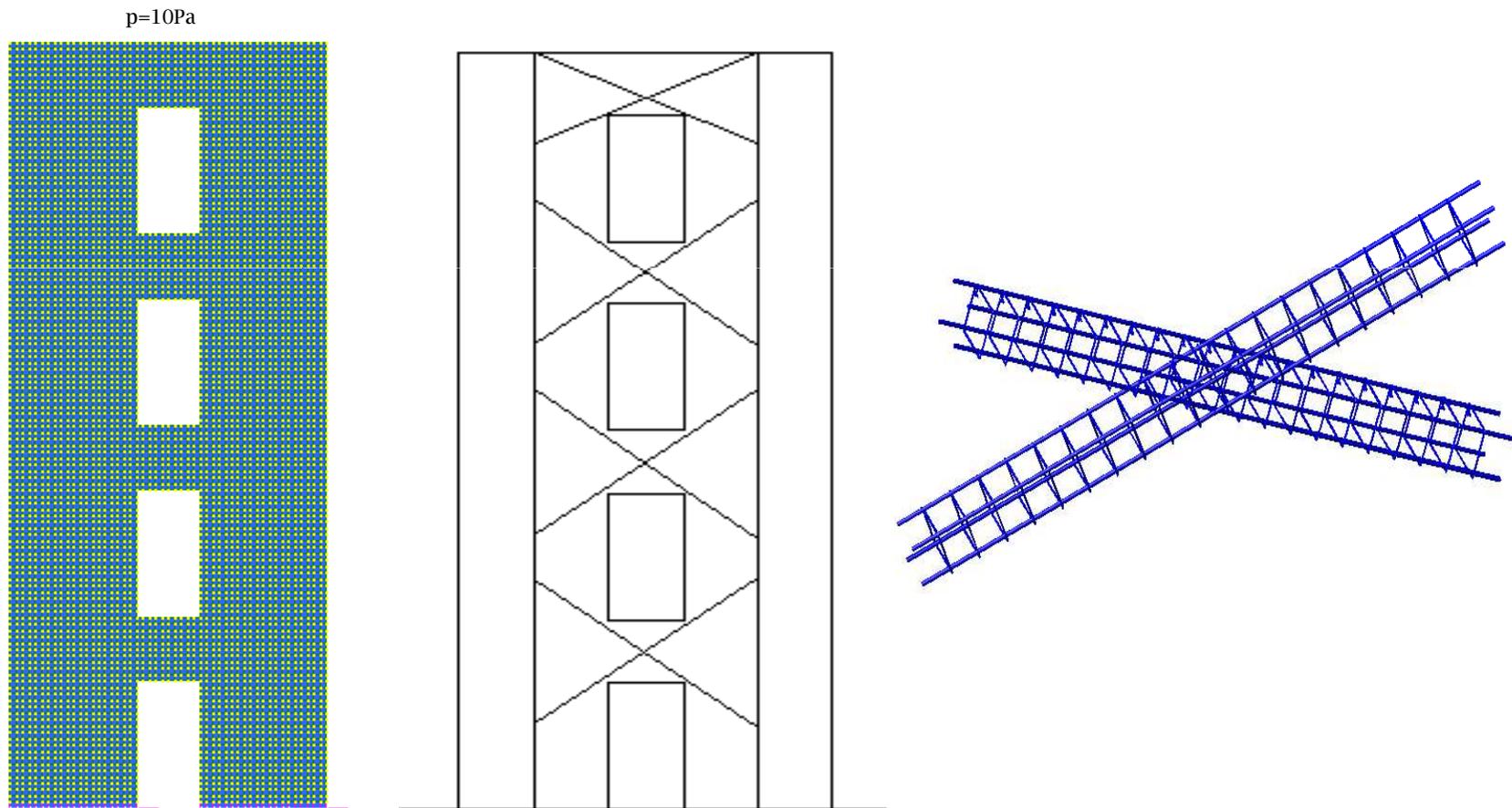
Problema piano di tensione



Problemi piani

Problema piano di tensione

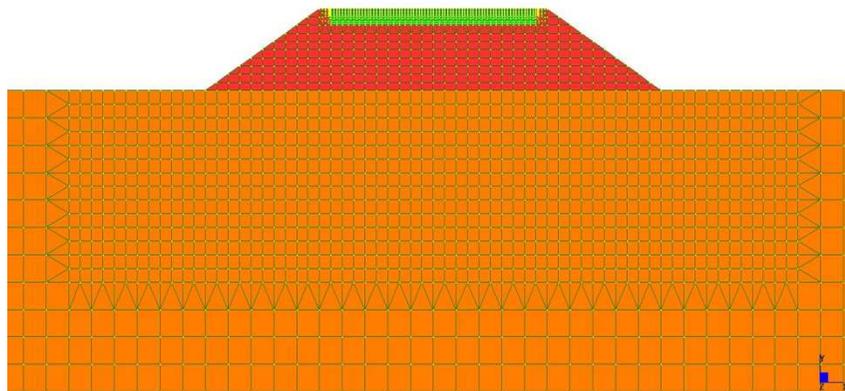
- **Mensola alla Rosman-Beck**



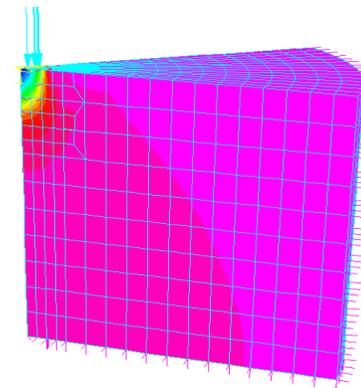
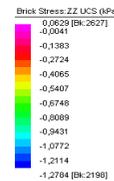
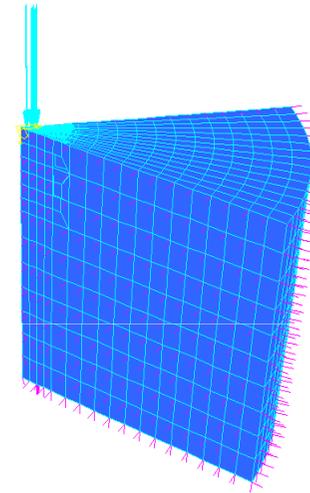
Problemi piani

Problema piano di deformazione

Rilevato stradale

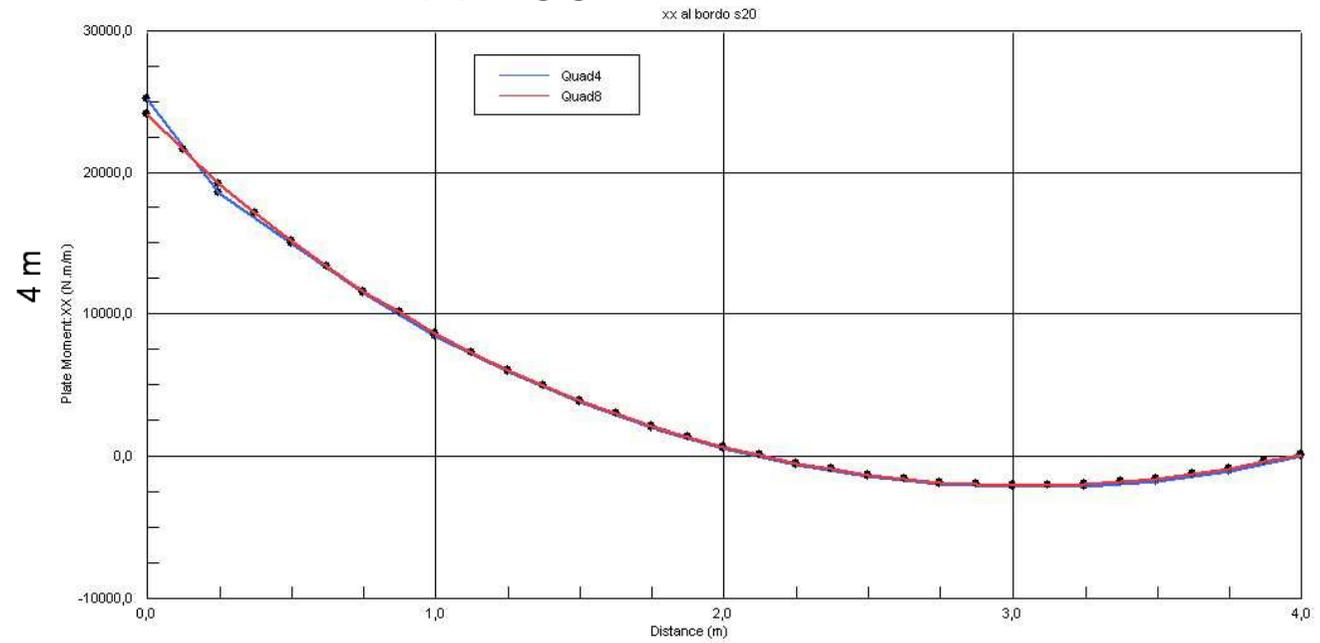
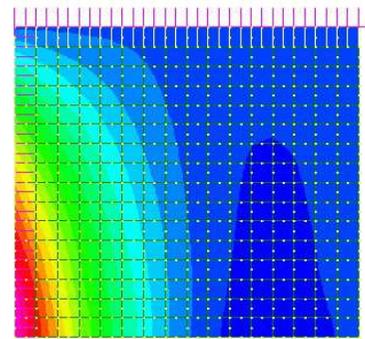
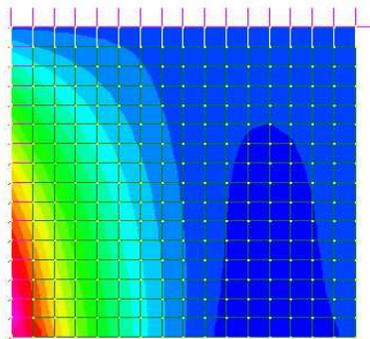
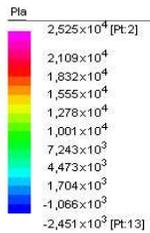
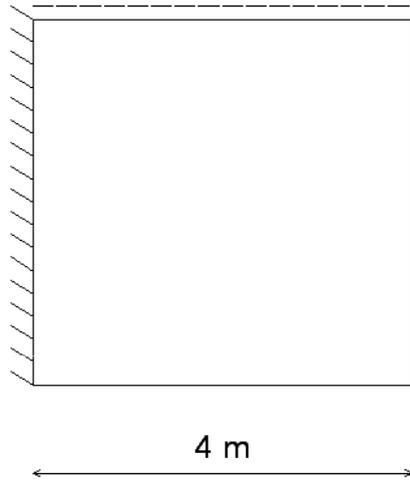


Pb. Assial simmetrico

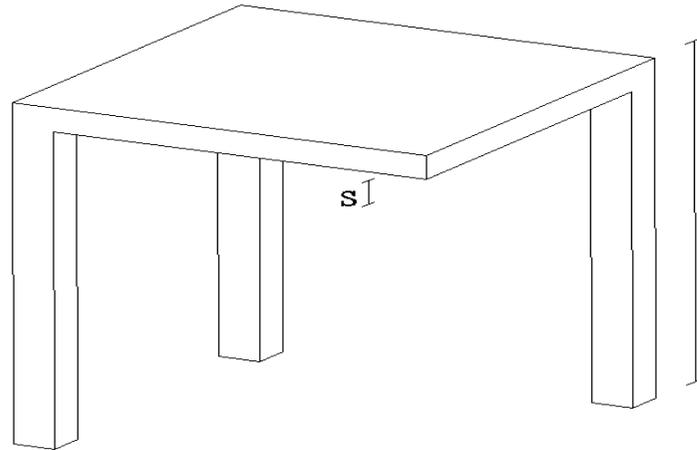
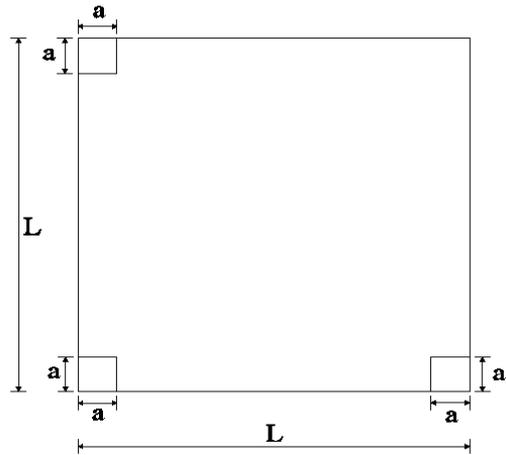


Piastre

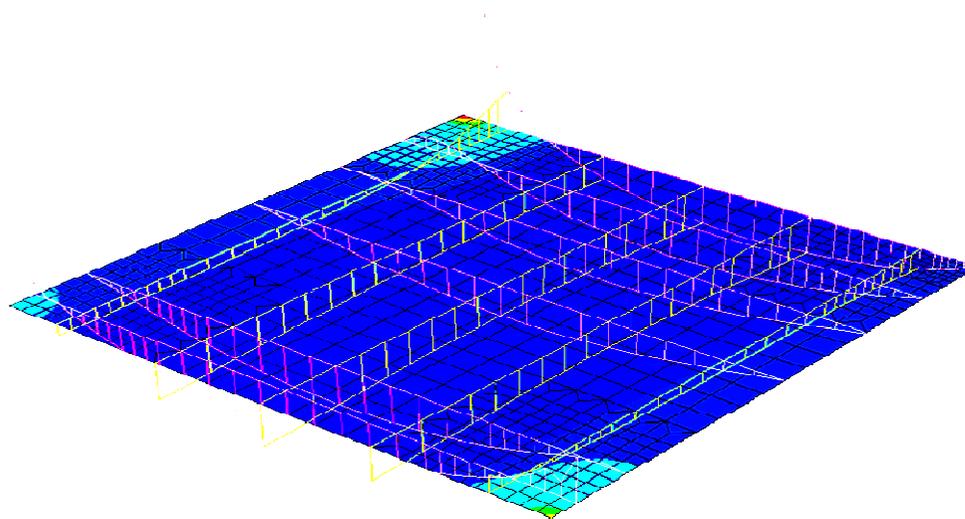
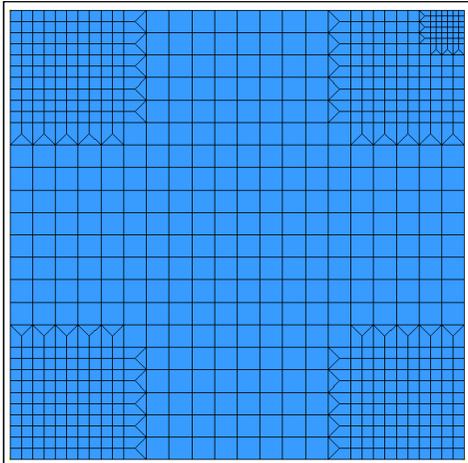
Piastra quadrata con un lato appoggiato ed uno incastrato



Piastre

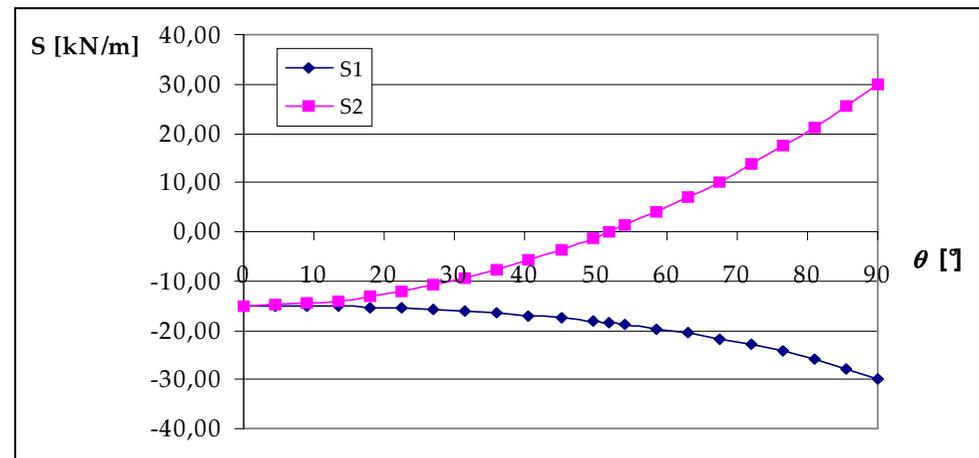
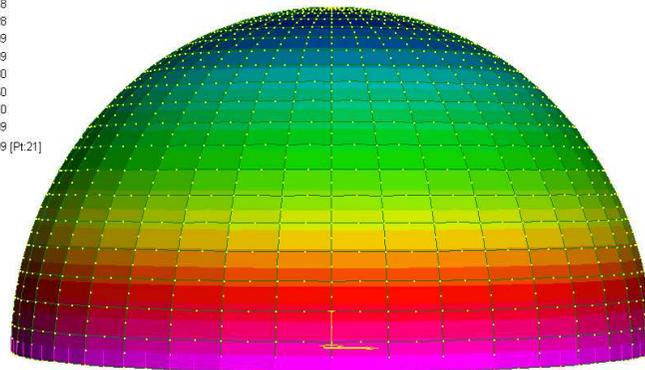
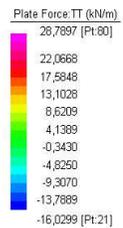
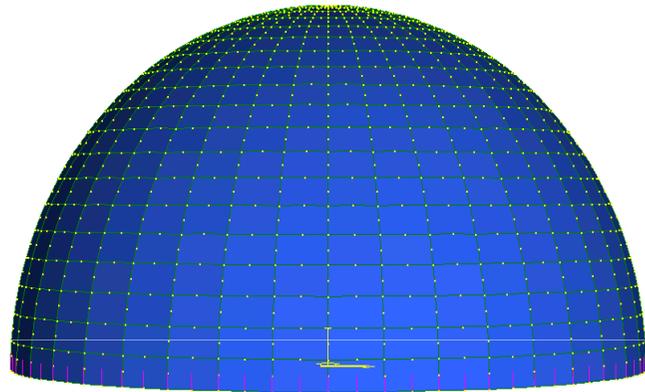


Piastra a sbalzo
su 3 pilastri

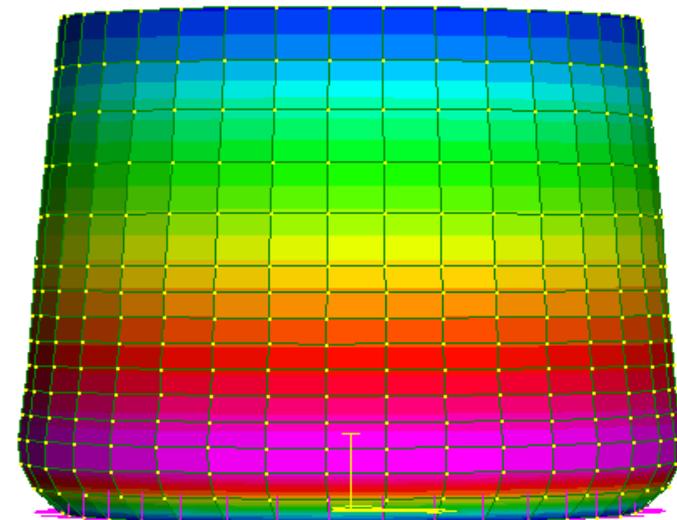
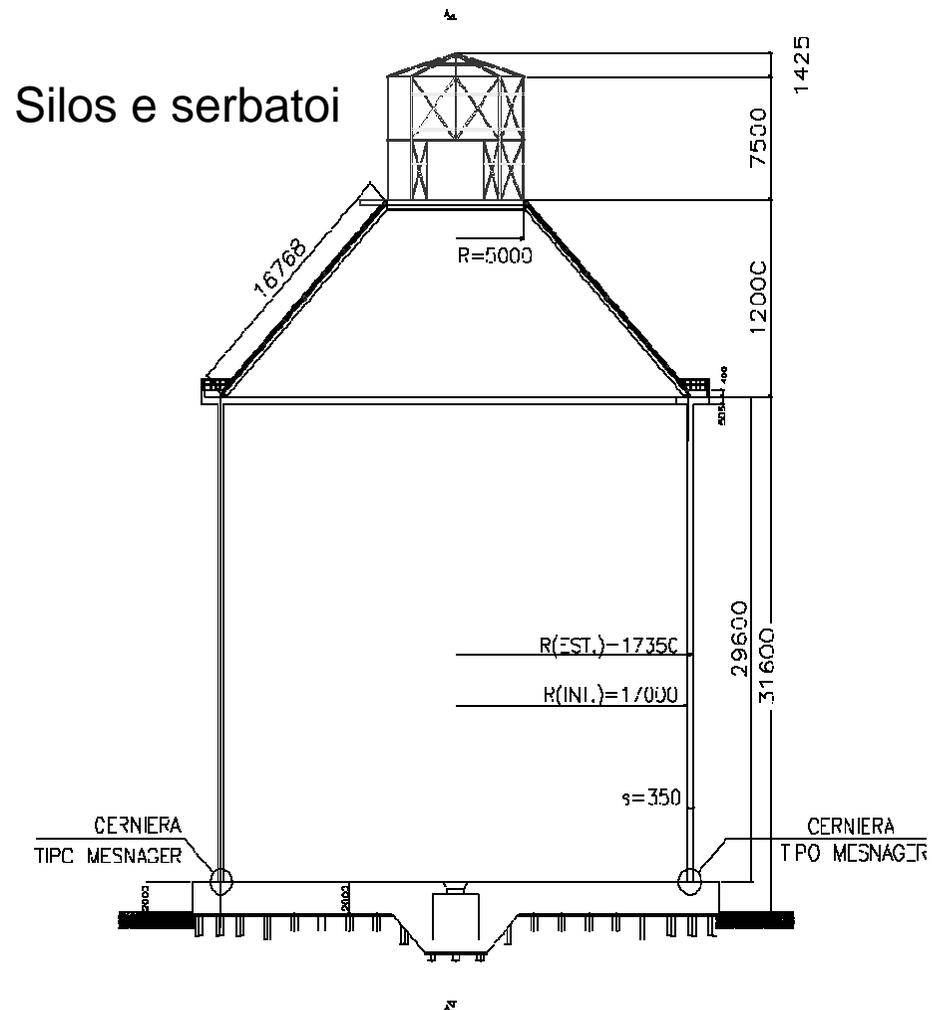


Membrane di rivoluzione

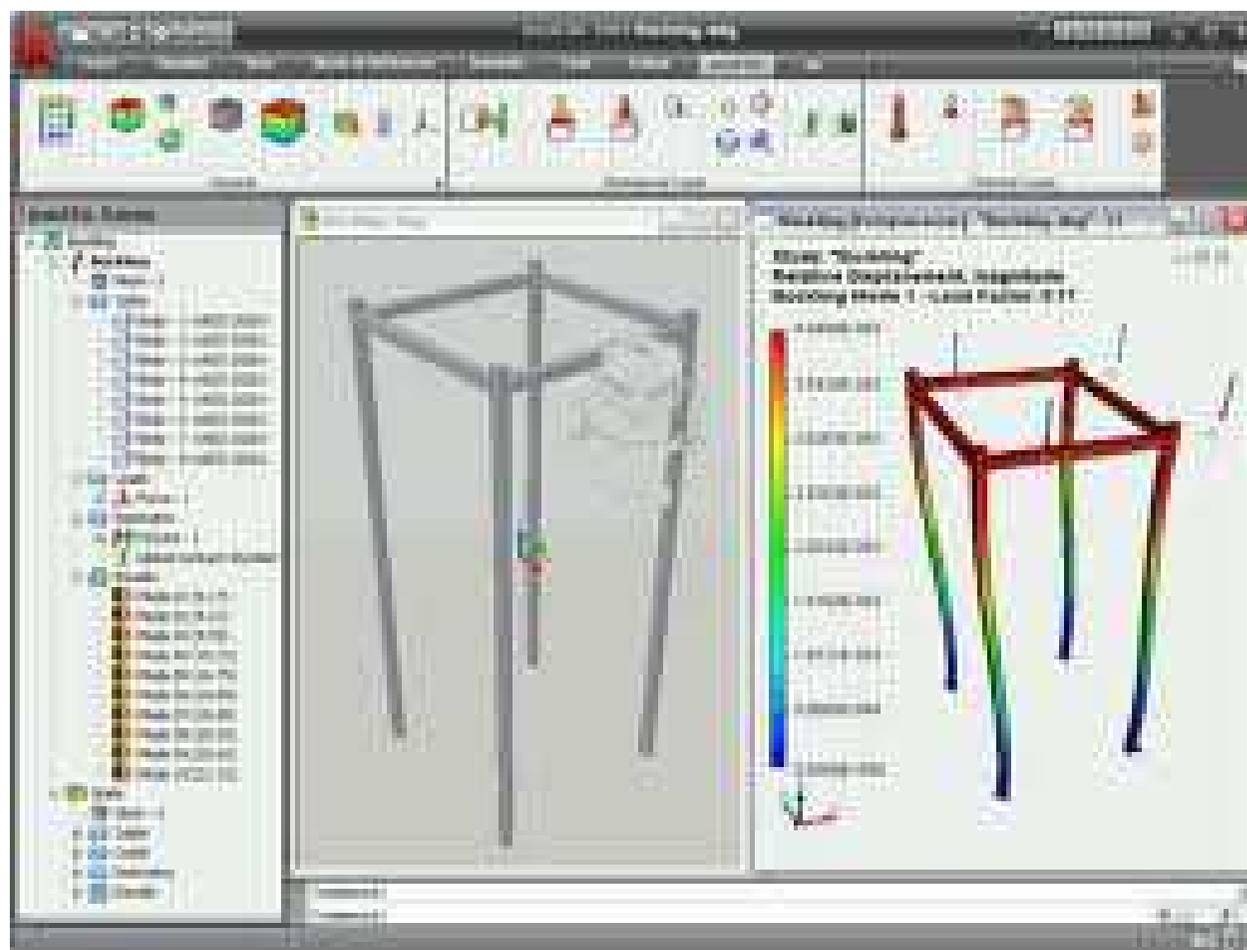
Cupola sferica
soggetta al peso
proprio



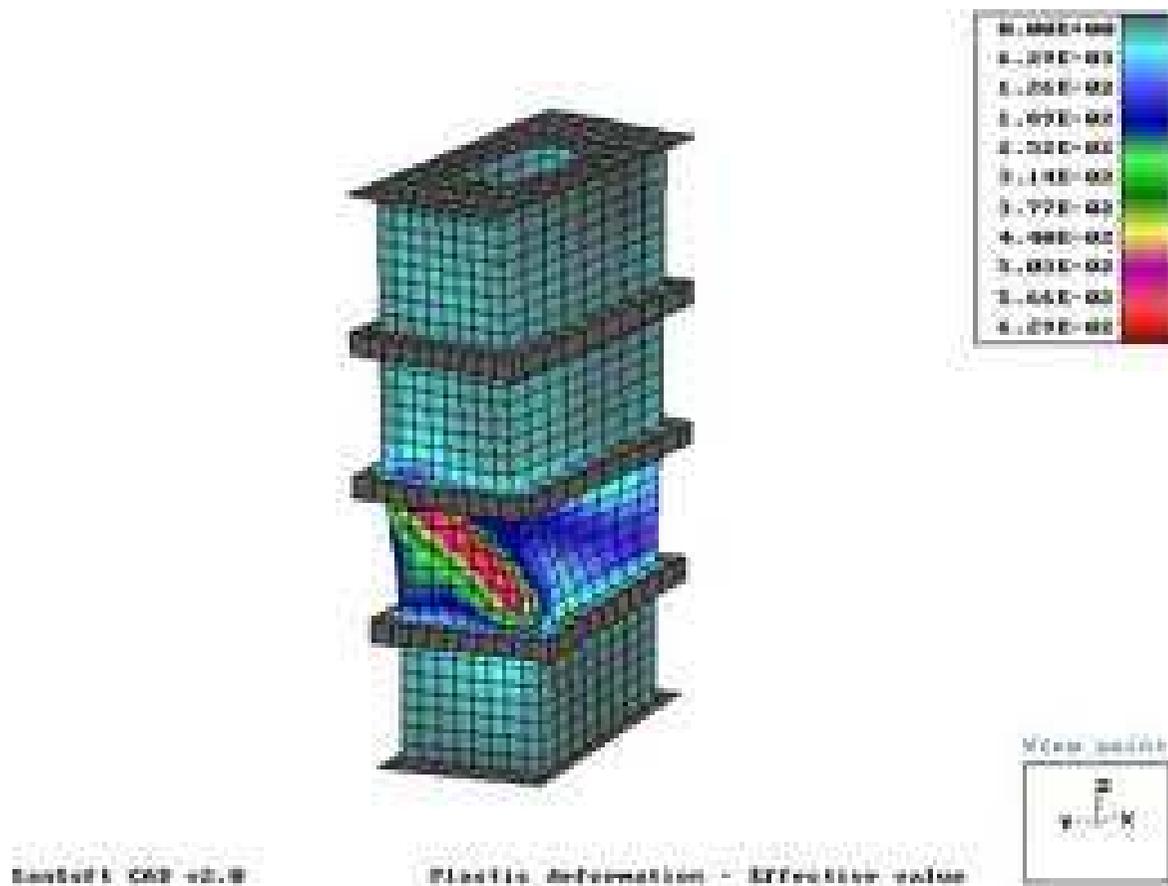
Lastre di rivoluzione



Instabilità



Instabilità



Instabilità

