

**Università di Parma**

**DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA**



**CRISTIAN CAVOZZI**

**La tettonica del sale: modellistica  
analogica e sviluppo tecnologico per  
l'acquisizione di dati 4D**

**Tutore: Chiar.ma Prof.ssa Elisabetta Costa**

**Coordinatore del dottorato: Prof. Renzo Valloni**

**XVIII Ciclo – Anno Accademico 2004/2005  
Dipartimento di Scienze della Terra**

# INDICE

## INTRODUZIONE

Cap.		pag.
<b>I</b>	<b>LE EVAPORITI ED IL SALE: CARATTERISTICHE.....</b>	<b>1</b>
1.1	Minerali delle evaporiti.....	1
1.2	Contesti deposizionali.....	1
1.2.1	Evaporiti singenetiche.....	2
1.2.2	Evaporiti diagenetiche precoci.....	3
1.2.3	Evaporiti diagenetiche secondarie.....	3
1.2.4	Evaporiti clastiche.....	3
1.3	Origine delle evaporiti .....	4
1.4	Contesti geodinamici .....	7
1.5	Reologia del sale.....	8
<b>II</b>	<b>LA TETTONICA SALINA.....</b>	<b>12</b>
2.1	Tipi di tettonica salina.....	12
2.2	Reologia delle rocce della crosta superiore.....	14
2.2.1	Reologia della copertura.....	15
<b>III</b>	<b>LA MODELLISTICA ANALOGICA DELLA TETTONICA SALINA.....</b>	<b>18</b>
3.1	La modellistica analogica.....	18
3.2	Storia della modellistica analogica.....	18
3.3	Tecniche di modellistica analogica.....	21
3.4	Reologia dei materiali di modellistica.....	22
3.4.1	La copertura.....	23
3.4.2	Il livello viscoso.....	25
3.5	Lo scaling dei modelli.....	29
3.5.1	Criteri di somiglianza.....	29
3.5.2	Dalla natura al modello.....	32

<b>IV</b>	<b>IL NUOVO BANCO DI MODELLISTICA.....</b>	<b>33</b>
4.1	Introduzione.....	33
4.2	Sviluppo e messa a punto di un nuovo banco di modellistica.....	35
4.2.1	Introduzione.....	35
4.2.2	Dimensioni del banco.....	36
4.2.3	Caratteristiche strutturali.....	37
4.2.4	Sviluppo del banco.....	40
4.3	Sviluppo e messa a punto di un sistema automatico per l'acquisizione del top del modello, mediante scansione.....	43
4.3.1	Introduzione.....	43
4.3.2	Tecniche di acquisizione.....	45
4.3.3	Analisi e scelta delle soluzioni tecniche.....	47
4.3.4	Sensore laser.....	48
4.3.5	Sistema cartesiano del laser.....	50
4.3.6	Software.....	51
4.4	Sviluppo e messa a punto di un sistema automatico per l'acquisizione dell'interfaccia silicone-sabbia.....	53
4.4.1	Introduzione.....	53
4.4.2	Benchmark quantitativo per la verifica di funzionamento della tecnica a scanner laser nel monitoraggio del profilo di interfaccia sabbia-silicone...	55
4.5	Sviluppo e messa a punto di un sistema di sedimentazione automatico.....	70
4.5.1	Introduzione.....	70
4.5.2	Definizioni dei requisiti e dei limiti applicativi.....	72
4.5.3	Analisi e verifica di soluzioni progettuali.....	74
4.5.4	Soluzione adottata.....	78
4.5.5	Caratterizzazione del sistema.....	82
4.5.6	Analisi dei dati e conclusioni.....	94
4.6	Progettazione di un sistema per la misura e l'acquisizione degli sforzi presenti sulla parete di deformazione.....	94
4.6.1	Introduzione.....	94
4.6.2	Analisi di soluzioni progettuali.....	94
4.6.3	Soluzione adottata e test pilota.....	96
4.6.4	Modelli di prova per l'acquisizione della pressione.....	100
4.6.5	Analisi dei dati e conclusioni.....	114
4.6.6	Sviluppi futuri.....	117
<b>V</b>	<b>MODELLI ANALOGICI.....</b>	<b>116</b>
5.1	Modelli in estensione (STA).....	116

5.1.1	Generalità dei margini passivi.....	116
5.1.2	Modellizzazione dei margini passivi.....	119
5.1.3	Obiettivi dei modelli.....	120
5.1.4	Primo set di modelli.....	121
5.1.5	Risultati.....	123
5.1.6	Secondo set di modelli.....	123
5.1.7	Risultati.....	124
5.1.8	Conclusioni.....	127
5.2	Benchmark test.....	129
5.2.1	Set-up modelli.....	129
5.2.2	Risultati.....	130
5.3	Modelli bacino salifero kunguriano.....	135
5.3.1	Introduzione.....	135
5.3.2	Area di studio.....	135
5.3.3	Problemi dell'area.....	138
5.3.4	<i>Set-up</i> dei modelli.....	139
5.3.5	Obiettivi dei modelli.....	140
5.3.6	Risultati.....	142
5.3.7	Conclusioni.....	147
	<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>149</b>
	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....</b>	<b>150</b>

## INTRODUZIONE

La presente tesi di dottorato è il risultato di un lavoro multidisciplinare, che ha portato allo sviluppo di nuove tecniche per lo studio della tettonica salina, mediante l'utilizzo della modellistica analogica.

La collaborazione tra un ente privato (ENI S.p.a.) e un ente pubblico (Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Scienze della Terra, Dipartimento di Fisica e Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale) ha permesso di progettare e mettere in opera un banco di modellistica all'avanguardia nel panorama internazionale, grazie alle innovative soluzioni tecniche adottate.

Il dottorato di ricerca dal titolo "*La tettonica del sale: modellistica analogica e sviluppo tecnologico per l'acquisizione di dati 4D*" si è sviluppato essenzialmente lungo due filoni, che sono avanzati di pari passo:

- a) studio di sistemi geodinamici comprendenti il sale e loro modellizzazione fisica
- b) sviluppo di nuove tecniche di modellistica fisica e costruzione di un complesso apparato di modellizzazione per la loro applicazione

Dato che lo sviluppo dell'apparato di modellizzazione si è concluso praticamente alla fine del dottorato, lo studio dei sistemi reali tramite la modellistica ha sfruttato, di volta in volta, le nuove tecnologie acquisite fino a quel momento, di modo che gli ultimi modelli realizzati, mostrano tecniche di modellizzazione e, soprattutto di monitoraggio e acquisizione dei dati sul sistema in corso di deformazione, molto perfezionate rispetto ai primi. Nessun modello svolto per questo lavoro di dottorato ha potuto tuttavia sfruttare completamente le nuove tecnologie attualmente disponibili.

## Cap. I

### LE EVAPORITI ED IL SALE: CARATTERISTICHE

#### 1.1 Minerali delle evaporiti

I minerali evaporitici più comuni sono il gesso, l'anidrite e il salgemma (*halite*):

Gesso:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - solfato di calcio idrato che precipita direttamente dall'acqua marina.

Anidrite  $\text{CaSO}_4$  - solfato di calcio anidro (gesso anidro) che deriva dalla disidratazione del gesso. Il passaggio gesso-anidrite avviene con una riduzione di volume pari al 38% ed aumento di porosità. Il passaggio è reversibile (gesso->anidrite->gesso).

Salgemma  $\text{NaCl}$  – cristalli cubici

Oltre a questi minerali si ritrovano anche carbonato di calcio e solfati e cloruri di K e Mg.

L'*halite* in natura si incontra più raramente del gesso o anidrite perchè il punto di saturazione e precipitazione della salgemma richiede elevati gradi di isolamento del bacino di sedimentazione. Precipita direttamente dall'acqua marina dopo il gesso (AA. VV., 1991).

#### 1.2 Contesti deposizionali

Le evaporiti sono sali precipitati per evaporazione del solvente. Si distinguono evaporiti singenetice/deposizionali, evaporiti di diagenesi precoce, evaporiti di diagenesi tardiva ed evaporiti clastiche.

- Evaporiti singenetice-deposizionali

Si formano per nucleazione di sali all'interfaccia acqua-aria con successiva decantazione sul fondo del bacino. Sono subacquee, stratificate

con grande estensione laterale e spessore regolare. Costituite principalmente da salgemma e gesso cristallino finemente laminato. Si formano in bacini perenni, lagune o laghi perenni, specchi d'acqua effimeri (AA. VV., 1991).

- Evaporiti di diagenesi precoce o primaria

Si formano sotto l'interfaccia deposizionale per evaporazione delle soluzioni interstiziali in ambiente arido. Precipitano quindi in un sedimento ospite; la loro crescita può preservare o obliterare le strutture precedenti. Costituite principalmente da gesso (in condizioni più umide da sub a sopratidali), anidrite (in condizioni più secche, generalmente con crescita di noduli che spingono lateralmente il sedimento ospite). Il salgemma è raro, solo in croste. Queste evaporiti, spesso associate a dolomie, sono tipiche di ambienti di *sabkha* (AA. VV., 1991).

- Evaporiti di diagenesi secondaria

Successive alla litificazione, per stress tettonico, possono essere pseudomorfiche senza alterazione macroscopica (stratificazione e strutture preservate) o derivanti da ristrutturazioni sostanziali (variazioni in porosità, cristallinità) (AA. VV., 1991).

- Evaporiti clastiche

Derivanti per frammentazione di precedenti depositi evaporitici (eolianiti e gessoclastiti)

### **1.2.1 Evaporiti singenetiche**

Le evaporiti singenetiche si formano per evaporazione diretta di acqua salata in bacini semichiusi, collegati al mare aperto da uno stretto, o in bacini completamente isolati. In entrambi i casi sono bacini poco profondi o comunque con sottile lama d'acqua. Le evaporiti singenetiche sono quindi subaquee e stratificate (AA. VV., 1991).

### **1.2.2 Evaporiti diagenetiche precoci**

Le evaporiti diagenetiche di diagenesi precoce, come abbiamo visto nello schema introduttivo, precipitano all'interno di un sedimento ospite, e possono essere stratificate o massicce, subaeree o subacquee. Le evaporiti diagenetiche precoci si formano per esempio in pianure sopratidali in clima arido (*sabkha*), come ad esempio lungo la costa sudoccidentale del Golfo Persico. Come vedremo più avanti in una *sabkha*, la precipitazione può avvenire su vasta scala, entro il sedimento preesistente, soprattutto nella frangia capillare che sta sopra la tavola d'acqua. Le evaporiti diagenetiche precoci si formano anche in aree desertiche, anche montane, in depressioni temporaneamente riempite da acque ipersaline (AA. VV., 1991).

### **1.2.3 Evaporiti diagenetiche secondarie**

Le evaporiti diagenetiche di diagenesi secondaria sono molto posteriori alla litificazione del sedimento. Si possono formare per variazioni delle condizioni chimico-fisiche all'interno di un sedimento antico sepolto in zone sottoposte a regime di stress tettonico (faglie, pieghe). Soluzioni interstiziali impregnanti il sedimento possono dare origine a corpi evaporitici localizzati e discordanti. Le evaporiti diagenetiche di diagenesi secondaria sono corpi deformati che non indicano, quindi, direttamente l'ambiente primario di formazione. Un aspetto spettacolare delle evaporiti diagenetiche tardive è la formazione di diapiri, legati alla risalita di salgemma che, in virtù della sua bassa densità, intrude le rocce incassanti fino a volte sfondare la copertura sedimentaria e giungere alla superficie (AA. VV., 1991).

### **1.2.4 Evaporiti clastiche**

Derivano dalla frammentazione e/o rimozione delle precedenti evaporiti in ambiente sedimentario. Tra queste ci sono le *eolianiti* che si possono ritrovare come dune di sabbia gessosa e/o alitica e le gessoclastiti rappresentate da detrito gessoso di diverse taglie (gesso ruditi, gesso areniti, gesso siltiti), puro o mescolato con altri tipi di particelle. Le gessoclastiti possono presentare una vasta gamma di strutture, tessiture, geometrie e

ambienti dei comuni depositi clastici. Il gesso può facilmente ricristallizzare o mobilizzarsi e riprecipitare come cemento (BOSELLINI ET AL., 1998).

### 1.3 Origine delle evaporiti

L'origine dei vasti depositi evaporitici presenti sulla Terra ha generato molte teorie e ipotesi che possono essere divise in due gruppi principali.

Un primo gruppo comprende le teorie secondo quali l'origine delle evaporiti è collegata ad aree marginali (lagune, golfi, piane tidali); il secondo gruppo include tutte le teorie secondo le quali l'origine delle evaporiti è collegata alla presenza di depressioni continentali (laghi salati, mari chiusi). La principale differenza consiste nell'assunzione che nel primo caso il sistema di deposizione si presenti idrologicamente aperto rispetto all'acqua marina, il secondo invece il sistema è di tipo chiuso. Nel gruppo delle aree marginali si ritrovano due teorie ritenute più probabili: la teoria del "modello della salina" e la teoria del "modello della *sabkha* costiera" (AA. VV., 1991).

*Modello della salina* > La salina è una depressione adiacente alle coste, separata dal mare da uno stretto canale o da una barriera fisica che viene superata in occasione di particolari condizioni di marea (maree sigiziali, *wind tide* o *storm tide*). Condizione necessaria alla formazione della salina è che si trovi in clima caldo, relativamente arido e che la profondità non superi qualche metro. Per spiegare l'accumulo di grossi spessori di sale è necessario che il fondo del bacino subisca una subsidenza che compensi il tasso di accumulo dei sali. Le saline marine sono simili alle saline di origine continentale, entrambe hanno gli stessi processi deposizionali. Componente tipica della salina è la crosta di fango e la presenza per breve o lungo periodo di tempo di piccoli corpi d'acqua. Una salina viene definita "*salina dry mud flats*" quando la crosta superficiale di fango è composta da sedimenti molto fini con un sottile strato di sale, e presenta fratture ben evidenti; i sedimenti sono depositati da piogge e temporali improvvisi. La "*salina mud flat*" è tipica di un ambiente di transizione tra il "lago salato" e la salina completamente disseccata, è molto simile alla *sabkha* che può essere usato come sinonimo.

*Modello della sabkha* > Questo modello presuppone una formazione diagenetica delle evaporiti, i minerali evaporitici si formano su scala regionale all'interno dei sedimenti. Sotto la superficie della *sabkha* (50-100 cm), si incontra l'acqua della falda freatica salata, che per capillarità risale ed evaporando deposita i sali (pompaggio evaporitico).

#### Depositi evaporitici in zone prossimali alle coste

I depositi marginali di sale si originano in ambiente ipersalino subaereo o subacqueo, localizzato in zona pertidale o in zone con barriere. La zona pertidale, viene periodicamente invasa da acqua marina, la zona delimitata da barriere viene inondata da piogge o da acqua di falda. Le zone di ambiente subacqueo vengono denominate saline, le zone di ambiente subaereo vengono denominate *sabkha*.

#### Saline

Le saline marginali marine, sono sistemi evaporitici caratterizzati dal fatto che sono parzialmente o completamente isolati dal mare e sono coperte da acqua per un breve o lungo periodo di tempo: se la permanenza dell'acqua è lunga vengono denominate saline perenni; se si alternano periodi di presenza-assenza di acqua vengono denominate saline effimere. In entrambi i casi la componente maggiore dei sali evaporitici deriva dalla precipitazione durante la fase con acqua e si preservano grandi volumi di sali. Oltre alla componente salina si ritrovano sedimenti silicoclastici derivati da ambienti marini o continentali depositati nelle saline da fiumi, venti e correnti marine; i carbonati precipitano direttamente dall'acqua marina o vengono trasportati dall'ambiente marino da correnti (AA. VV., 1991).

Le saline marginali si possono formare nei seguenti ambienti: *sabkha*, margini distali di delta, zone temporanee di delta e interdune costiere (Figura 1.1).

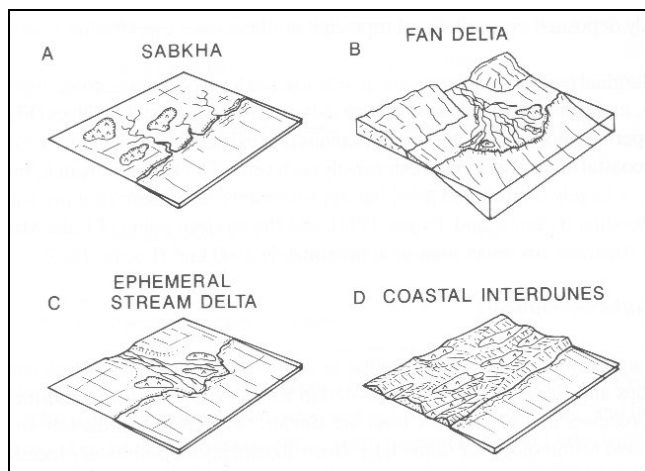


Figura 1.1 - Saline in margini marini ( da J.L. MELVIN, 1991)

Nelle depressioni, l'acqua marina entra grazie alle correnti di marea, agli *storm tide* e *wind tide*; l'acqua marina ha l'importante effetto di aggiungere nuovi sali solubili, di dissolvere e riprecipitare i sali preesistenti.

Le saline marine marginali si presentano anche al di sotto del livello del mare, in depressioni tettoniche o bacini, dietro a barriere oppure in bacini isolati da barre sabbiose di origine eolica. Tuttavia i grandi depositi di sale esistenti, si suppone che non abbiano avuto origine da queste morfologie.

### *Sabkha*

Le *sabkha* si ritrovano in zone prossimali a coste e possono essere o sopra o sotto il livello medio del mare, presentano sedimenti silicoclastici o carbonatici parzialmente cementati da sali evaporitici, tali sedimenti vengono depositati periodicamente da alluvioni e sono esposti all'azione erosiva per la maggior parte dell'anno. Le evaporiti precipitano secondo due sistemi: per evaporazione dell'acqua di origine meteorica o per evaporazione dell'acqua marina presente sotto i sedimenti e risalita per capillarità. La superficie di accumulo è frequentemente erosa e modificata dal vento e dissolta da alluvioni improvvise.

Le *sabkha* si possono ritrovare in piane allungate sopratidali delle coste, in depressioni interdunali e in depressioni al di sotto del livello medio marino separate da quest'ultimo da barriere. Le depressioni che si trovano al di sotto

del livello medio marino e vengono inondate periodicamente sono denominate saline e non *sabkha*.

Le *sabkha* si formano per deposizione *offlap* di sedimenti marini nelle zone subtidali, intertidali e sopratidali; la sequenza pertidale e sopratidale non supera generalmente lo spessore di 1 metro. Le *sabkha* recenti sono formate da sedimenti fangosi carbonatici e sabbiosi in una matrice silicoclastica, tali sedimenti contengono gesso, anidrite e sale. I sedimenti marini vengono trasportati dal mare e depositati nelle *sabkha* dalle forme più intense di maree (maree sigiziali, *storm tide*, *wind tide*), i sedimenti continentali sono trasportati e depositati da processi fluviali. Le *sabkha* sono caratterizzate da una copertura formata da un crostone alitico modellato in poligoni dalla compressione (crescita cristallina), questa crosta si solubilizza ogni qualvolta che piogge o acqua marina la ricopre (AA. VV., 1991).

#### 1.4 Contesti geodinamici

I bacini sedimentari, in condizioni di stress climatici, idrogeologici o tettonici possono talvolta ospitare occasionalmente depositi di tipo evaporitico. Le situazioni geodinamiche favorevoli alla precipitazione e all'accumulo di depositi evaporitici possono essere schematizzate nel seguente modo:

1. Tettonica quiescente: all'interno e ai margini dei continenti (mari epicontinentali, lagune, aree deltizie, saline, *sabkha*)
2. Tettonica attiva in regime distensivo: fosse tettoniche (*riffts*) intracontinentali (*playas*, bacini intermontani)
3. Tettonica attiva in regime compressivo: bacini deformati e coinvolti nelle sorgenti catene orogeniche (bacini *piggy-back*)

In condizioni di tettonica quiescente si ritrovano i più vasti corpi evaporitici del mondo, tra cui la Salina, una formazione siluriana negli Stati Uniti centro settentrionali, la Elk Point, una formazione devoniana del Canada occidentale e quelle permiane come la Castile tra il Texas, New Mexico e Messico; in Europa il bacino permiano dello Zechstein si estende tra la Germania, Danimarca, Olanda, Isole Britanniche e il Mare del Nord. Gli spessori di queste formazioni,

prevalentemente sepolte, variano da 500 a 1000 m., estendendosi su aree che spesso superano i 1000 Km<sup>2</sup> (AA. VV., 1991).

In condizioni di tettonica distensiva la formazione delle evaporiti è correlata al processo di *rifting*, in particolare si possono ritrovare due situazioni: la prima precede la separazione continentale e l'apertura oceanica (evaporiti giurassiche e cretache sepolte sotto i margini atlantici, evaporiti mioceniche del Mar Rosso); la seconda si ha durante il "rilassamento" isostatico tardo e post-orogonico (evaporiti permiane e triassiche dei margini europeo e africano, evaporiti oligo-mioceniche della Fossa del Reno, evaporiti Messiniane del Mediterraneo occidentale) .

In condizioni di tettonica attiva si possono ritrovare evaporiti nelle avanfosse orogeniche e nei margini continentali, un esempio è rappresentato dalla formazione Gessoso-solfifera del Miocene superiore, originata durante l'emersione della catena appenninica e il prosciugamento del mediterraneo.

### 1.5 Reologia del sale

Da dati di laboratorio e da osservazioni in superficie e in miniera di rocce saline si è visto che queste, esclusi i primi metri di profondità, non si comportano in modo fragile come tutte le altre rocce della copertura, ma si deformano nel tempo senza fratturarsi. Il movimento delle evaporiti avviene mediante processi di *creep*, favoriti dall'acqua in soluzione. Poiché la deformazione delle evaporiti avviene con *strain rates* molto bassi tipici dei processi geologici (Figura 1.2), essa può essere considerata direttamente proporzionale allo sforzo applicato, e quindi si possono considerare le rocce saline come materiali a comportamento newtoniano.

L'*halite*, al contrario delle rocce fragili della copertura, ha un comportamento viscoso e ciò implica che la resistenza alla rottura dipenda direttamente dallo *strain rate*, come appare dall'equazione di Newton

$$\tau = \mu (\dot{\epsilon})^n \quad (1)$$

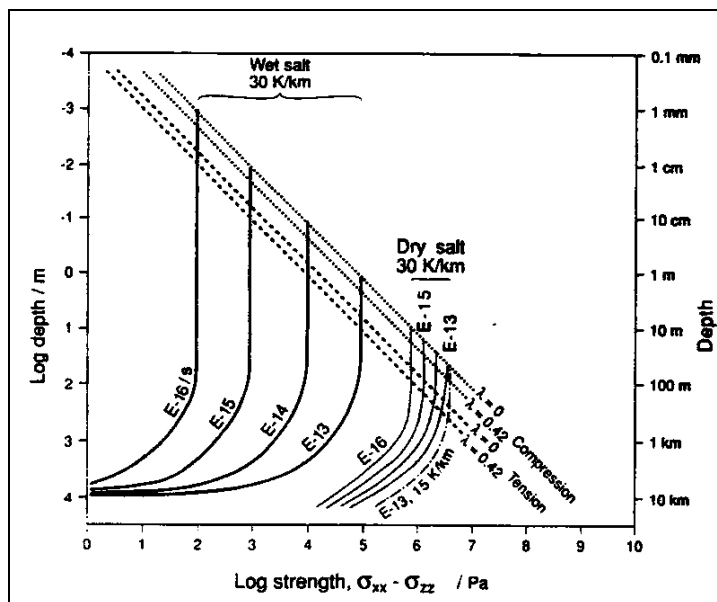


Figura 1.2. Curve log. di resistenza per il sale umido e secco a *strain rates* variabili da 10<sup>-13</sup> a 10<sup>-16</sup>/s, con una geoterma di 30K/km ed una temperatura superficiale di 275 K. Le linee rette tracciano gli involucri della deformazione fragile alle stesse condizioni. (WEIJERMARS ET AL., 1993)

Dove  $\mu$  = viscosità (Pa/s),  $\dot{\epsilon}$  = tasso di deformazione ( $t^{-1}$ )  $n$  = coefficiente tipico del materiale. Come si deduce dalla (1) un materiale viscoso con  $n=1$  presenta una relazione lineare tra sforzo e deformazione. Tutti i materiali che hanno questo comportamento vengono detti “fluidi newtoniani”. I materiali in cui  $n \neq 1$  la relazione tra sforzo e deformazione è di tipo esponenziale e vengono definiti “fluidi non-newtoniani” (WEIJERMARS & SCHMELING, 1986) (tab 1.1).

Le evaporiti, a tassi di deformazione tipici della tettonica, hanno  $n = 1$  e vengono considerate come materiali a comportamento newtoniano; il loro coefficiente di viscosità varia tra  $10^{16} < \mu < 10^{19} \text{ Pa s}^{-1}$  (VENDEVILLE ET AL., 1995) che confrontato con quello medio delle rocce della crosta continentale inferiore con  $\mu$  vicino a  $10^{21} \text{ Pa s}^{-1}$ , indica la minore resistenza delle evaporiti rispetto alle altre rocce della copertura (Figura 1.3). La viscosità delle evaporiti si mantiene costante se non c'è soluzione salina tra i cristalli (*brine*) che attiva il meccanismo di *diffusion creep* (URAI ET AL., 1986; SPIERS ET AL., 1988), riducendo  $\mu$  si facilita ulteriormente la deformazione (WEIJERMARS ET AL., 1993; VENDEVILLE ET AL., 1995).

Esponente	Tipo di flusso	Curva di flusso	Meccanismo di deformazione
$n = 1$	Viscoso (newtoniano)	Lineare	Diffusion creep
$n > 1$	Strain softening o Shear thinning (non newtoniano)	Esponenziale	Dislocation creep
$n < 1$	Strain hardening o Shear thickening (non newtoniano)	Esponenziale	

Tab. 1.1 Relazioni tra il tipo di flusso (POIRIER, 1980) e il meccanismo di deformazione corrispondente.

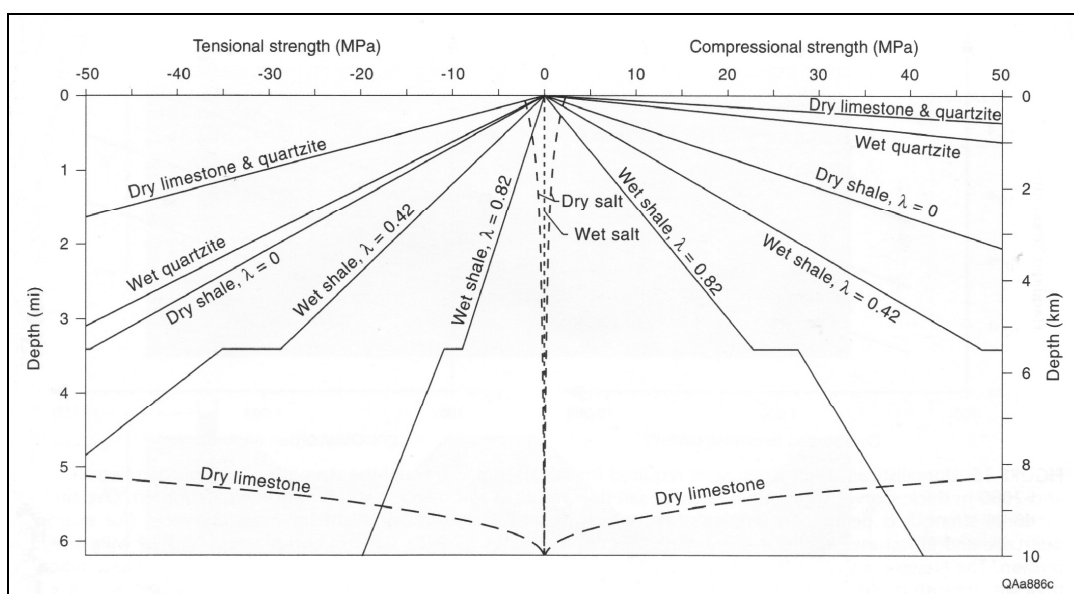


Figura 1.3 Diagramma che illustra la resistenza di vari tipi di rocce in funzione della profondità (WEIJERMARS ET AL., 1993)

Il sale che presenta quest'acqua inter-cristallina viene definito "umido" (*wet salt*  $0 < \lambda < 1$ ) altrimenti viene definito sale "secco" (*dry salt*,  $\lambda = 0$ ). Quest'ultimo si deforma generalmente con un meccanismo di *dislocation creep* (HANSEN & CARTER, 1984) eccetto che nei primi 10 m di profondità in cui segue il criterio di deformazione fragile.

Quasi tutte le rocce saline possono essere considerate "umide" in quanto contengono una percentuale in peso di  $H_2O$  inter-cristallina che varia da 0,1 a 1. Considerando che la quantità di questa  $H_2O$  richiesta per attivare il *diffusion*

*creep* è di appena 0,05% in peso (URAI ET AL., 1986), si può dedurre che quest'ultimo è il meccanismo di deformazione dominante per il sale, soprattutto ai bassi tassi di deformazione caratteristici dei processi geologici ( $10^{-14} \text{ s}^{-1}$ ) (WEIJERMARS & SCHMELING, 1986).

Nel *diffusion creep* c'è una relazione quasi lineare tra sforzo e deformazione (cfr.eq. 4, in WEIJERMARS ET AL., 1993) tanto che il sale "umido" può essere considerato un fluido newtoniano. Nel *dislocation creep (dry salt)*, invece il rapporto tra *stress* e *strain* è di tipo esponenziale (cfr. eq. 2, 2b in WEIJERMARS ET AL., 1993) caratteristica che rende il sale secco un fluido non-newtoniano.

## Cap. II

# LA TETTONICA SALINA

## 2.1 Tipi di tettonica salina

La tettonica salina studia la geometria e la cinematica delle deformazioni delle rocce della crosta, dovute al flusso delle rocce saline. La particolarità della tettonica che interessa bacini con sale è legata alla diversa reologia, a parità di tutte le altre condizioni, mostrata dal sale e, in certe condizioni, dalle altre evaporiti solfatiche, rispetto a quella di tutte le altre rocce. I depositi evaporitici si possono trovare all'interno di successioni sedimentarie di ogni età; i depositi più estesi si trovano lungo i margini passivi dei continenti, al di sotto o all'interno di prismi sedimentari cretacici e terziari che contengono anche le formazioni più ricche al mondo di idrocarburi. Queste evaporiti, si sono deposte nelle lunghe e strette zone di *rift*, che costituiscono i bordi degli attuali continenti (non in tutti), durante i primi stadi di separazione della Pangea. In generale, le evaporiti si ritrovano in tutti i bacini stretti e poco profondi formati durante le fasi iniziali di estensione crostale, o in quei bacini in cui, sempre per ragioni legate alla tettonica globale delle placche, l'evaporazione ha superato gli apporti e si sono create le condizioni favorevoli alla deposizione di questi sedimenti (es. Mediterraneo). Quando un'area contenente rocce evaporitiche e, soprattutto, sale è sottoposta ad un regime di sforzi tettonici, o anche soltanto a differenze di pressione di tipo gravitativo, il sale, al contrario delle rocce che li circondano, si deforma per flusso molto precocemente, non avendo praticamente una soglia di resistenza. Le altre rocce, invece, si deformano in modo fragile.

(Figura 2.1). Questi meccanismi, determinano strutture e *patterns* di faglie differenti poiché corrispondono a diverse modalità di movimento del sale, a seconda dello spessore della copertura e del contesto tettonico regionale.

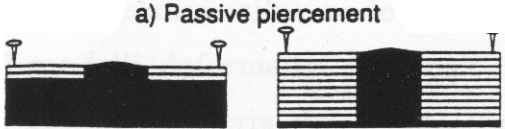
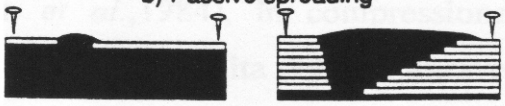
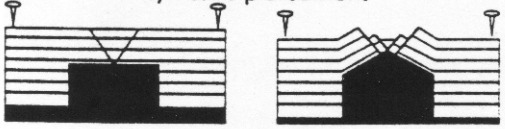
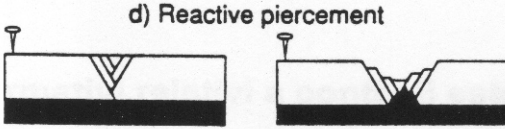
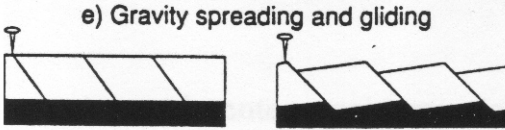
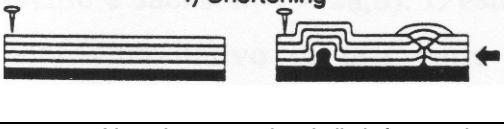
Meccanismo	Descrizione
 <p>a) Passive piercement</p>	Il sale emerge passivamente attraverso un'apertura nella copertura mentre la sua base sprofonda
 <p>b) Passive spreading</p>	Il sale si estende lateralmente mentre risale
 <p>c) Active piercement</p>	Il diapiro risale attivamente bucando una copertura di spessore ridotto
 <p>d) Reactive piercement</p>	Il sale emerge per reazione all'assotigliamento crostale provocato da estensione regionale
 <p>e) Gravity spreading and gliding</p>	L'estensione indotta dalla gravità lungo un pendio regionale, causa la formazione di <i>salt rollers</i>
 <p>f) Shortening</p>	Accorciamento regionale che determina la formazione di <i>box folds</i> e anticlinali con nucleo salino

Figura 2.1 Alcuni meccanismi di deformazione nella tettonica salina (da: Weijermars et al., 1993)

In base a queste caratteristiche, i vari meccanismi di tettonica salina si possono raggruppare in quattro tipi principali:

- Diapirismo passivo (*downbuilding*)
- Diapirismo attivo (*upbuilding*)
- Estensione e scivolamento gravitativo (che include il diapirismo reattivo)
- Accorciamento regionale

Nel diapirismo passivo (*downbuilding*) (BARTON, 1933) il top del sale si mantiene alla stessa profondità mentre la base dei sedimenti circostanti si approfondisce a causa del sottostante deflusso di sale (Figura 2.1 a-b). Se il tasso di sedimentazione è elevato e la copertura sopra il sale ha uno spessore variabile (Figura 2.1c), il carico differenziale dei sedimenti può fare aumentare la pressione del sale fino a fargli superare la resistenza alla rottura delle rocce

soprastanti e il diapiro risale attivamente bucando la copertura (diapirismo attivo o *upbuilding*).

Il terzo meccanismo detto diapirismo reattivo (VENDEVILLE & JACKSON, 1992A,B) associato ai due precedenti si ha quando la copertura viene fagliata e assottigliata da una estensione regionale. L'estensione regionale può innescarsi per *stretching* crostale (Figura 2.1d), o per scivolamento, o spandimento indotti dalla gravità (Figura 2.1e). In entrambi i casi, l'assottigliamento della copertura crea le condizioni di pressione necessarie alla risalita diapirica. L'assottigliamento provoca una risalita del sale lungo i piani di faglia (fase reattiva), poco dopo subentra la foratura della copertura (fase attiva) e il diapiro può continuare la crescita (fase passiva) se il tasso di risalita resta in equilibrio con quello di sedimentazione e se il sale è ancora in quantità sufficiente da poter alimentare il diapiro (VENDEVILLE & JACKSON, 1992A,B).

Il quarto e ultimo tipo di tettonica salina (Figura 2.1f), è legato all'accorciamento regionale di sequenze sedimentarie al di sopra di un livello salino (DAVIS & ENGELDER, 1985, 198; VENDEVILLE, 1991) data la resistenza quasi nulla del sale, questo rappresenta il livello di scollamento preferenziale. Nella copertura si formano *box folds* e *salt-cored anticline* e la deformazione si distribuisce in un'area molto ampia. Occorre notare che questo quadro della tettonica salina è notevolmente semplificato, in natura geometria e distribuzione delle strutture può essere complicata sia dalla combinazione di questi meccanismi, sia dalla sedimentazione che può essere pre, sin e post tettonica.

## 2.2 Reologia delle rocce della crosta superiore

La litosfera che comprende la crosta e una parte superiore del mantello, è costituita da rocce a comportamento variabile. Il comportamento della litosfera è funzione delle proprietà meccaniche dei minerali. Lo stress varia non solo in funzione della composizione ma anche in funzione della profondità (Figura 2.2)

Il comportamento reologico di una roccia è dipendente dalle condizioni ambientali, cioè dalla temperatura e pressione a cui si trova e dalla pressione dei fluidi eventualmente presenti in essa.

Le rocce della crosta inferiore (velocità delle onde sismiche da 6.5 a 7.6 km/s) e del mantello hanno un comportamento duttile, la maggior parte delle rocce della crosta superiore (velocità delle onde sismiche fino a 6,5 km/s) si deformano in modo fragile ad esclusione delle rocce evaporitiche e delle argille in sovrappressione, che hanno un comportamento duttile anche a condizioni di pressione e temperature superficiali.

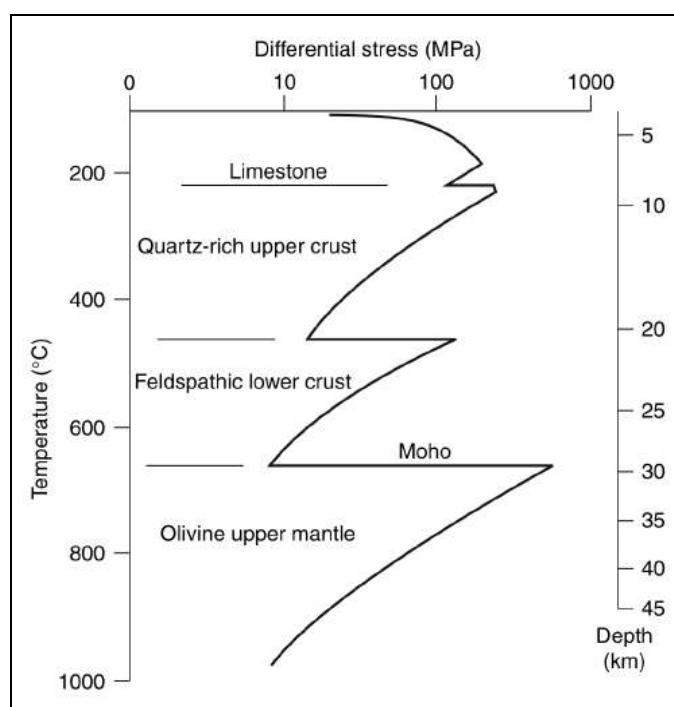


Figura 2.2 Stratificazione reologica della litosfera basata sulle proprietà meccaniche dei minerali. Lo stress varia non solo in funzione della composizione ma anche in funzione della profondità. (da <http://ic.ucsc.edu/~casey/eart150/Lectures/Rheology/13rheology.htm>)

Mentre infatti le altre rocce, a profondità non elevate, mostrano caratteristiche fragili (se sottoposte a sollecitazioni si deformano debolmente e, oltre un certo livello, si fratturano), il sale mostra uno spiccato comportamento duttile (se sottoposto a sollecitazione si deforma in modo irreversibile e la deformazione aumenta al passare del tempo); in sostanza, il sale più che come un solido si comporta come un fluido estremamente viscoso.

Una roccia con comportamento duttile, si deforma come un materiale viscoso, in cui la resistenza alla rottura non dipende dalla profondità, ma dal tasso di deformazione (*strain rate*).

Una roccia con comportamento fragile subisce una deformazione di tipo frizionale-plastico, con la resistenza alla rottura che aumenta linearmente con l'aumento della profondità.

La tettonica salina interessa la parte superiore della crosta, per questo motivo nel prossimo paragrafo, analizzeremo con maggiore dettaglio il comportamento delle rocce che costituiscono la copertura.

### 2.2.1 Reologia della copertura

La quasi totalità delle rocce comprese tra i 10-15 Km di profondità, si comportano in modo fragile; le loro condizioni di resistenza alla rottura sono molto simili tra di loro (HOSHIMO *ET AL.*, 1972, BYERLEE, 1978) e aumentano in modo lineare con la profondità. Tali rocce obbediscono al criterio di rottura di Mohr-Coulomb, che mette in relazione lo sforzo di taglio  $|\tau|$ , parallelo al piano di faglia, con lo sforzo  $\sigma_n$ , normale a questo piano secondo l'equazione:

$$\tau = C_0 + \mu (\sigma_n - Pf) \quad (2)$$

Dove  $C_0$  è la coesione del materiale misurata in MPa,  $\mu$  è il coefficiente di frizione interna (adimensionale),  $Pf$  è la pressione dei fluidi che diventa importante in materiali poco permeabili e ricchi d'acqua come le argille. La (2) può anche essere scritta in forma semplificata come:

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi \quad (3)$$

Dove  $\sigma_n$  è lo sforzo normale agente sulle superfici e  $\varphi$  è l'angolo d'attrito interno del materiale. L'angolo che compare nella (3) è detto angolo di attrito di base tra due superfici e dipende dal tipo di roccia esaminata (in caso di movimenti lungo una faglia già formata in precedenza).

L'equazione (2) evidenzia che lo sforzo di taglio ( $\tau$ ), che causa la rottura della roccia, è direttamente proporzionale allo sforzo normale  $\sigma_n$ , a sua volta proporzionale alla profondità.

Le rocce argillose, si comportano in modo diverso. Il loro elevato contenuto in acqua, fa aumentare la pressione dei fluidi ( $P_f$ ) e quindi riduce lo sforzo necessario per far avvenire la rottura (cfr. eq. 2). Questo comportamento provoca una bassa resistenza delle rocce argillose e le rende simili alle evaporiti. Il contenuto in fluidi, espresso mediante il coefficiente di pressione dei fluidi  $\lambda$  (uguale a  $P_{\text{fluidi}}/P_{\text{litostatica}}$ ) è utile per conoscere la resistenza delle rocce della crosta superiore, sale compreso. Se  $\lambda = 0$ , la roccia viene definita "secca" (*dry rock*), e la sua resistenza è maggiore di quella in cui  $\lambda > 0$ , che viene detta "umida" (*wet rock*) (WEIJERMARS ET AL., 1993). In funzione del tipo di roccia, di  $\lambda$  e del gradiente geotermico ( $\xi$ ) varia la profondità di transizione tra deformazione fragile e duttile. (WEIJERMARS ET AL., 1993).

## Cap III

# LA MODELLISTICA ANALOGICA DELLA TETTONICA SALINA

### 3.1 La modellistica analogica

La modellistica analogica è una tecnica di laboratorio, che consente di riprodurre in piccola scala sistemi geodinamici reali e ha come scopo l'analisi dei processi deformativi a varie scale (da litosferica a mesoscopica) e la verifica di ipotesi di evoluzione deformativa ricavata dallo studio geologico-strutturale sul terreno. Il vantaggio dei modelli analogici è che offrono l'opportunità di studiare l'influenza dei vari parametri sulla geometria e cinematica dei sistemi deformativi, difficilmente deducibili partendo dall'analisi dei dati reali. Tuttavia, la modellizzazione analogica non si deve intendere unicamente come la riproduzione in scala di situazioni reali, ma come una metodologia destinata a studiare i parametri che influenzano lo sviluppo dei processi geologici, e determinare l'influenza di ciascuno di essi sulla geometria e cinematica.

### 3.2 Storia della modellistica analogica

Il primo esperimento di modellizzazione documentato in letteratura è quello condotto da Sir James Hall, presentato alla *Royal Society of Edinburgh* agli inizi del XIX secolo (1812). In questo primo esperimento si utilizzarono dei pezzi di stoffa sovrapposti per simulare gli strati, applicando forze che provocarono la formazione di pieghe (Figura 3.1); successivamente l'Autore utilizzò anche dell'argilla (Figura 3.2). Nonostante l'utilizzo di materiali rudimentali, questi esperimenti dimostrarono come la compressione sia uno dei processi che può portare alla formazione di pieghe in natura.

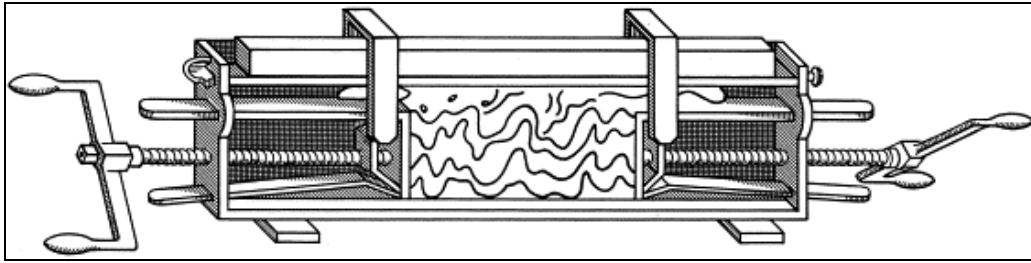


Figura 3.1 Scatola di deformazione progettata da James Hall (Ranalli, 2001)



Figura 3.2 Scatola di deformazione con modellino in argilla ( fonte internet)

Dal pionierismo del XIX secolo, numerosi altri modellizzatori iniziarono a studiare i fenomeni geologici in laboratorio (FAVRE 1878, DAUBRE 1879, SCHARDT 1884, CADELL 1889, WILLIS 1893).

Nel XX secolo, la teoria di Hubbert nel 1937 rivoluziona la modellizzazione analogica, trasformandola da tecnica descrittiva a tecnica quantitativa. Questa teoria dimostra che una riduzione delle dimensioni del modello e dei tempi di deformazione deve essere accompagnata da una riduzione proporzionale nella resistenza dei materiali utilizzati. Questa importante osservazione permetterà di

studiare i processi geologici alle varie scale (per esempio dall'analisi mesostrutturale ai processi tettonici). Durante gli anni '60 e '70 un notevole contributo allo sviluppo delle tecniche di modellizzazione analogica è stato dato da Hans Ramberg, i cui lavori hanno gettato le basi per lo studio sistematico della modellizzazione dei processi gravitativi enfatizzando la loro importanza nello sviluppo delle strutture geologiche (RAMBERG, 1981). Gli studi di Ramberg hanno rappresentato il punto di partenza per numerosi altri lavori che hanno dato un notevole contributo allo studio del diapirismo e strutture simili, con particolare riferimento, viste anche le implicazioni petrolifere, alla tettonica salina (vedi, ad esempio, la recente revisione di JACKSON, 1995). Un'altra importante tappa nello sviluppo della modellistica, in particolare dei processi tettonici su grande scala, si è avuta negli anni 80, quando si realizzarono modelli per simulare sia la crosta terrestre che la litosfera. In questi modelli i materiali fragili e viscosi furono combinati e si realizzarono i primi esperimenti di subduzione della crosta nella litosfera. Tuttavia, una limitazione di tali modelli è rappresentata dal fatto che non viene considerato il cambiamento della reologia delle rocce dovuta alle variazioni di temperatura durante i fenomeni di subduzione. Alcuni tentativi per trovare materiali da utilizzare nella modellistica termomeccanica furono realizzati da Cobbold e Jackson nel 1992 e da Rossetti *et. al.* nel 1999, tali materiali furono utilizzati nella modellistica termomeccanica dei cunei orogenici (ROSSETTI ET AL. 2000). Recentemente la modellizzazione analogica sperimentale, grazie allo sviluppo di nuove tecniche per la quantificazione ed anche per l'analisi progressiva della deformazione dei modelli, ha avuto un notevole sviluppo confermandosi una tecnica molto utile e relativamente poco costosa per l'analisi dei processi tettonici. Gli esperimenti, attualmente, sono in grado di investigare un campo molto ampio di strutture geologiche e processi tettonici: dall'analisi del *boudinage* e degli indicatori di taglio (pochi mm di sezione) (PASSCHIER AND SOKOUTIS, 1993); ai modelli di tettonica regionale; al collasso gravitativo; allo sviluppo ed all'evoluzione di sistemi di *thrust*; alla tettonica estensionale; ai fenomeni di trascorrenza e di transpressione e transtensione; alla messa in posto dei plutoni; all'analisi della convezione a scala crostale e fenomeni di subduzione (WEIJERMARS, 1992;

SHEMENDA & GROCHOLSKY, 1992). Anche processi particolari come erosione e sedimentazione sintettonica possono essere riprodotti in laboratorio, studiando così la loro influenza nello sviluppo delle strutture tettoniche.

### 3.3 Tecniche di modellistica analogica

Diverse tecniche sono usate per riprodurre i processi tettonici a grande scala come la subduzione, il *rifting* e la deformazione gravitativa. Una prima divisione può essere fatta dividendo i modelli deformati nel normale campo gravitativo e quelli deformati in particolari centrifughe in cui viene aumentata la forza di gravità. La deformazione in centrifuga presenta il vantaggio di poter utilizzare materiali con una resistenza maggiore. Gli svantaggi sono; il costo elevato dell' apparato e la difficoltà nell'acquisire i dati durante la deformazione. La modellistica in centrifuga è stata introdotta da Bucky nel 1931 (Bucky, 1931); negli anni '60 nel laboratorio dell'università di Uppsala in Svezia viene costruito un laboratorio specializzato nella deformazione in centrifuga. Il lavoro di Hans Ramberg ad Uppsala ha migliorato la conoscenza del ruolo della gravità nella deformazione della crosta terrestre e della litosfera. Dagli anni '60 in poi la tecnica della centrifuga è stata ampiamente utilizzata per studiare i processi geologici (RAMBERG, 1970; DIXON, 1974, 1975; TALBOT, 1977; DIXON AND SUMMERS, 1985; KOYI, 1988; LIU AND DIXON, 1990; KOYI AND SKELTON, 2001). Tale tecnica ha dominato la modellistica analogica per circa tre decenni, ma ora è stata in gran parte sostituita da modelli analogici deformati nel campo normale di gravità, in cui vengono utilizzati materiali con una resistenza minore. I vantaggi di tale tecnica sono rappresentati dal minor costo dei banchi di deformazione, la possibilità di monitorare ed acquisire dati durante tutta la deformazione e il costo più basso dei materiali di costruzione dei modelli. Uno svantaggio di tale metodo si ha durante la costruzione di modelli con profili di densità invertiti (per esempio una litosfera oceanica al di sopra di una astenosfera meno densa). Esistono diversi tipi di tecniche di modellistica che principalmente sono rappresentati dall'approssimazione reologica della litosfera e del mantello. Il primo metodo, sviluppato a Rennes (Francia) consiste nel riprodurre le rocce con comportamento fragile mediante sabbie quarzose, le

rocce con comportamento viscoso vengono riprodotte con gel di silicone, miele e sciroppo di glucosio. Questi materiali vengono ampiamente usati per studiare un'ampia varietà di fenomeni geologici (subduzione, estensione gravitativa). Un secondo metodo consiste nell'utilizzare materie plastiche per modellizzare le rocce, tale metodo è stato utilizzato per riprodurre lo scontro della placca Indiana con quella Euro-asiatica (TAPPONNIET ET AL., 1982). Chemenda costruì modelli in cui le cere simulavano la litosfera e l'acqua simulava l'astenosfera in contesti di subduzione. Un terzo metodo consiste nell'utilizzo di materiali a varie viscosità per riprodurre sia la litosfera che il mantello. Ogni livello è rappresentato da un materiale con una reologia viscosa omogenea (e.g. BIRD AND PIPER, 1980; ENGLAND AND MCKENZIE, 1982; VILOTTE ET AL., 1982; HOUSEMAN AND ENGLAND, 1986). Nel quarto ed ultimo metodo la litosfera e il mantello vengono modellizzati con materiali viscosi dipendenti dalla temperatura. In questi modelli viene applicato un gradiente termico simulante il gradiente geotermico sia della litosfera che del mantello. Questi modelli sono stati utilizzati per studiare i processi di *rifting* (BRUNE AND ELLIS, 1997), di subduzione (KINCAID AND OLSEN, 1987) e lo sviluppo termomeccanico dei cunei orogenici (ROSSETTI ET AL., 2000).

### 3.4 Reologia dei materiali di modellistica

L'evoluzione strutturale e la fagliazione delle sequenze sedimentarie che giacciono al di sopra di evaporiti, può essere simulata da modelli analogici in scala che impieghino un substrato viscoso al di sotto di una copertura fragile, usando polimeri di silicone (PDMS), per il substrato, e sabbia a grana fine, per la copertura (vedi cap. 3.4). Questi esperimenti, mostrano patterns di superfici di frattura che sono molto simili a quelli che si vedono nelle sezioni sismiche di sequenze sedimentarie fagliate (NETTELTON & ELKINS, 1947; VENDEVILLE & COBBOLD, 1987; VENDEVILLE, 1988; COBBOLD ET AL., 1992).

Dagli importanti lavori di Weijemars, Jackson e Vendeville del 1993, si ribadisce l'importanza di modellizzare la tettonica del sale mediante l'utilizzo di sabbia in copertura e silicone come substrato, in questo modo si riescono ad individuare i meccanismi fondamentali della *salt tectonic*.

Dopo aver analizzato il comportamento sotto sforzo dei materiali della crosta superiore implicati nella tettonica salina occorre che tali materiali siano “reologicamente scalati” con i materiali utilizzati in laboratorio (WEIJERMARS & SCHMELING, 1986). Questo, infatti, è il primo passo per una corretta riduzione in scala del sistema naturale da riprodurre, che garantirà la possibilità di applicare i risultati ottenuti alla situazione reale. (HUBBERT, 1937).

Per poter utilizzare un materiale reologicamente simile alla roccia che si vuole riprodurre occorre che la forma e la pendenza della curva che indica la deformazione sotto sforzo sia simile alla curva della roccia (WEIJERMARS & SCHMELING, 1986).

### 3.4.1 La copertura

Nel capitolo precedente, abbiamo visto come la copertura sedimentaria di un deposito salino si deformi essenzialmente in modo fragile; per questo, la caratteristica principale di un materiale destinato a riprodurre la copertura è che possa riprodurre la fagliazione fragile.

Durante la fase di progettazione di un modello analogico o numerico, è fondamentale effettuare uno *scaling* adeguato dei parametri fisici del sistema naturale che si vuole riprodurre. La fase preliminare di progettazione è necessaria per conoscere: le geometrie iniziali, le condizioni al contorno (es. tassi di erosione e sedimentazione, spessore iniziale del sale, angoli di *slope*, proprietà meccaniche dei limiti di strato) e la reologia delle rocce (evaporiti e copertura sedimentaria) che vengono coinvolte nella tettonica.

La buona conoscenza delle proprietà reologiche delle rocce che si vogliono riprodurre è la base di una corretta modellistica. All’inizio del secolo i primi tentativi di modellizzazione di diapiri salini vennero effettuati con l’assunzione che la copertura fosse più densa del livello salino sottostante, e con una viscosità simile (BARTON, 1933; NETTLETON, 1934, 1943). Le conclusioni di tali modelli portarono alla formulazione della teoria della *Rayleigh-Taylor instability*, con la quale si affermava che la formazione dei domi salini fosse il risultato di una instabile stratificazione per densità di fluidi diversi (NETTLETON, 1934;

RAMBERG, 1967). Alla fine degli anni '80 inizi '90 è stata abbandonata tale teoria, inadeguata per modellizzare la tettonica salina, in quanto le rocce della copertura si comportano in modo fragile e non duttile come le rocce evaporitiche.

Dal criterio di rottura di *Mohr Coulomb*, che descrive il comportamento fragile possiamo vedere che lo sforzo normale ( $\sigma_n$ ) è direttamente proporzionale allo sforzo di taglio ( $\tau$ ), non tenendo conto delle due costanti ( $S_0$  e  $\mu$ ), tipiche del tipo di roccia. Da ciò si deduce che, perché un modello sia dinamicamente simile al suo esempio reale, è necessario che:

1. il coefficiente di frizione interna ( $\mu$ ) del materiale di modellistica utilizzato sia simile a quello delle rocce considerate
2. la coesione della roccia ( $S_0$ ), misurata in MPa, sia ridotta di un rapporto simile a quello utilizzato per scalare gli altri sforzi (es.  $10^{-5}$ ,  $10^{-3}$  ecc. vedi cap. successivo)

La prima condizione (1) è assicurata da molti materiali granulari come la sabbia asciutta, e anche la seconda (2), che impone che la coesione del materiale di modellizzazione sia bassa (vedi cap. Lo *scaling* dei modelli).

Kranz (1991) ha misurato questi due parametri per la sabbia di *Fointanebleu* asciutta. Si tratta di un tipo di sabbia monomineralica e ben selezionata (vedi tab. 3.1), per la quale egli ha rilevato: una coesione ( $S_0$ ), variabile dai 30÷300 Pa per la sabbia versata, fino a 520 Pa della sabbia fatta cadere a pioggia, e un coefficiente d'attrito interno ( $\mu$ ) che oscilla tra 0,4 e 1 (Tab. 4). Confrontando questi valori con quelli misurati in natura ( $0,6 < \mu < 0,85$ ) o calcolati ( $S_0 \approx 300$  Pa: da WEIJERMARS ET AL., 1993) mediante le equazioni di *scaling* (vedi cap. Lo *scaling* dei modelli), si può notare che la sabbia risponde ai requisiti necessari per assicurare la somiglianza reologica con le rocce della crosta superiore; essa si comporta essenzialmente come un materiale coulombiano ed offre anche la possibilità di simulare la sedimentazione. Anche se i materiali granulari hanno suscitato parecchie polemiche per via della loro discontinuità e delle dimensioni dei grani, che, se riportata alla realtà risulterebbe inverosimilmente grande, essi possono essere considerati come un mezzo continuo (prima della propagazione delle faglie), se la scala a cui si

studia il fenomeno non è troppo grande (WEIJERMARS, 1993). Inoltre, i cambiamenti di volume, a cui i materiali granulari sono soggetti durante la deformazione del modello (impacchettamento dei grani) sono trascurabili perché minori di 2,5% (MANDL, 1988). Altri materiali granulari come l'argilla umida, gesso o barite (WITHJACK & JAMISON, 1986; NETTELTON & ELKINS, 1947; MULUGETA, 1985) implicano una coesione troppo alta per trovare riscontro nelle rocce naturali (MANDL, 1988), dopo aver effettuato il processo di *scaling* inverso.

Materiale	Composizione e dimensione delle particelle	Densità [g(cm <sup>3</sup> )]	Immersione delle faglie normali (gradi)	Coefficiente di attrito interno ( $\mu$ )	Coesione (Pa)
Sabbia asciutta <sup>1</sup> (versata)	Quarzo $\leq 0,5$ mm	1,53	56°-57°	0,40-0,45	300
Sabbia asciutta <sup>1</sup> (setacciata)	Quarzo $\leq 0,5$ mm	1,75 – 1,78	67°-68°	0,93-1,04	520
Microsfere <sup>1</sup>	Vetro $\leq 0,5$ mm	1,5		0,87	30
Argilla umida <sup>2</sup>	Caolino polverizzato, nefelina-sienite, silice (flint) $\leq 0,1$ mm	1,68	62°	0,52	40

<sup>1</sup> da Krantz 1991; <sup>2</sup> da Sims 1993

Tab. 3.1 proprietà dei materiali granulari usati per la modellistica analogica della copertura (da VENDEVILLE ET AL., 1995; modificato)

### 3.4.2 Il livello viscoso

Le rocce saline “fluiscono” per *creep* dove la maggior parte delle rocce cristalline si deformano in modo fragile. Il comportamento è simile a quello di un fluido viscoso in cui ad uno sforzo applicato ( $\sigma$ ), corrisponde una deformazione nel tempo ( $\dot{\epsilon}$ ) che aumenta in modo direttamente proporzionale allo sforzo. Un fluido di questo tipo si dice newtoniano e quindi il materiale di modellizzazione

che sta al di sotto della copertura, per poter riprodurre correttamente la reologia delle rocce saline, deve essere un fluido newtoniano. Dalla equazione  $[\tau = (\dot{\epsilon})^n \mu]$  si deduce che questo materiale deve avere un coefficiente di viscosità ( $\mu$ ) ridotto a quello della roccia stessa; questo infatti, influenzando il tasso di deformazione, agisce indirettamente sul tempo ( $\dot{\epsilon} = 1/t$ ) e quindi su una costruzione di una scala temporale, necessaria per eseguire l'esperimento e per aggiungere sabbia che simuli una sedimentazione sin-tettonica. Oltre a questi effetti indiretti la viscosità di tale livello ha anche effetti diretti sul modello soprattutto dopo l'inizio della deformazione, nel momento in cui si formano le faglie nella copertura, la viscosità del livello controlla direttamente il tasso di spostamento delle faglie poiché queste sono legate al movimento del livello viscoso stesso.

Da test effettuati (WEIJERMARS & SCHMELING, 1986; WEIJERMARS, 1986), risulta che, tra i numerosi materiali adottati nel corso delle sperimentazioni di laboratorio (paraffina, miele, mastici, bitume, olio, gelatine ecc.; es NETTELTON & ELKINS, 1947; TANNER & WILLIAMS, 1968), il gel di silicone è quello più adatto per modellizzare le rocce saline. In particolare, due tipi di polimeri siliconici soddisfano meglio i criteri di somiglianza reologica, con la curva di flusso che più si approssima a quella dell'*halite* (Figura 3.3). Si tratta del *polidimetilsiloxilane* (PDMS) o gel di silicone, e di un suo derivato borico, il *poliborodimetilsiloxane* (PBDMS), che in base al tipo di particelle fini con le quali viene mescolato diventa simile a un mastice e prende il nome di *Bouncing putty*. Nella tab 3.2 sono riportati i nomi commerciali, densità e viscosità dei prodotti più usati nella modellistica; l'SGM36, attualmente è il PDMS più utilizzato nei laboratori di tettonica, segue l'RGM, che fa parte dei PBDMS.

La formula chimica della molecola di base di questi polimeri (*dimetilsiloxilane*) è  $(\text{CH}_3)_2 \text{SiO}$ . L'unione di più molecole di questo tipo in catene lineari costituisce il polimero  $[(\text{CH}_3)_2 \text{SiO}]_x$ , in cui "x" rappresenta il grado di polimerizzazione ed esprime la lunghezza della catena. Il PDMS e il PBDMS usati in laboratorio hanno "x" abbastanza basso (10-100) e quindi si presentano come gel. Da catene più lunghe (100-1000 o più) si ottengono sostanze simili a cera o solide (WEIJERMARS, 1986). Il PBDMS si ottiene dai PDMS aggiungendo atomi di boro

che si vanno a posizionare tra le molecole di queste catene e tra una catena e l'altra, formando complessi di macromolecole. Se invece del boro si aggiungono al PDMS altri elementi reattivi che svolgono funzioni di *fillers*, si ottengono i *silicon putties*. Se al PBDMS si aggiungono *fillers* si ottengono i *bouncing putties*, così chiamati per il comportamento elastico che assumono proprio in seguito a questa fusione, e che si manifesta solo se lo sforzo è applicato in un tempo molto ridotto detto *Maxwell relaxation time* (WEIJERMARS, 1986A).

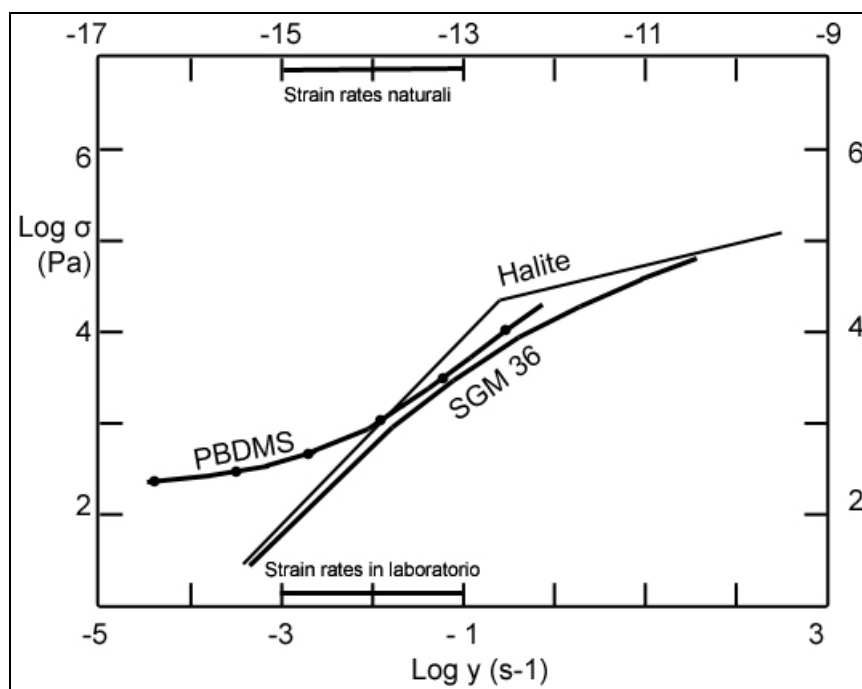


Figura 3.3. Diagramma in scala logaritmica che mostra la notevole somiglianza geometrica della curva di flusso del gel di silicone SGM 36, PBDMS con quella dell'halite (modificato da WEIJERMARS & SCHMELING, 1986)

Polimero di silicone	Prodotto	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	Viscosità [Pa/s]
Gel di silicone PDMS <sup>1,2</sup>	SGM 36; Dow Corning	0,97	5x10 <sup>4</sup> *
	RG20; Rhône Poulenc	0,95	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
Bouncing putty <sup>3</sup> PBDMS	GS1R Gomme; Rhône Poulenc	1.15	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
	RGM= Rhône Poulenc	1.14	3x10 <sup>4</sup> *
<sup>1</sup> da VENDEVILLE ET AL., 1995 <sup>2</sup> da WEIJERMARS, 1986 <sup>3</sup> da RICHARD & KRANTZ, 1991 * valori a temperatura ambiente			

Tab 3.2. Proprietà dei materiali viscosi utilizzati per la modellizzazione di rocce saline (da VENDEVILLE ET AL., 1995; modificato)

Se, ad esempio, un pezzo di questo materiale viene arrotondato e lasciato cadere, esso rimbalzerà, ma se viene lasciato su un piano, lentamente si espanderà fino al massimo consentito della sua tensione superficiale, comportandosi in modo viscoso. Queste caratteristiche variano molto in base al tipo di sostanza che viene aggiunta al PBDMS e alle dimensioni delle sue particelle (WEIJERMARS, 1986A), quindi per l'imprevedibilità del comportamento dei *bouncing putties*, si preferisce utilizzare il PDMS o il PBDMS.

A seconda del tipo di curva di flusso della roccia salina da riprodurre si può sfruttare l'ampia gamma di curve offerte dai polimeri siliconici e dalle loro combinazioni con altre sostanze (WEIJERMARS, 1986A) per scegliere o costruire il polimero che meglio soddisfa le nostre esigenze di "somiglianza reologica".

I meccanismi di deformazione dei polimeri gel differiscono significativamente dai meccanismi di *creep* delle rocce saline che risultano essere anche fortemente influenzati dalle condizioni di temperatura e pressione (CARTER, 1983). Queste ultime, invece, su un polimero hanno solo l'effetto di spostarne la curva di flusso ma non ne intaccano la forma generale. Tuttavia un'analogia fra i due materiali la si può ritrovare nel fatto che la lunghezza delle catene di molecole influenza la viscosità, così come la dimensione dei minerali ha effetto sul "flusso" della roccia. Anche se ciò può sembrare insufficiente, come abbiamo già detto, la teoria dei modelli in scala (BUCKINGAM, 1914; BRIGDMAN,

1931; HUBBERT, 1937) richiede solo la somiglianza delle curve che descrivono il comportamento reologico delle rocce, e i polimeri siliconici offrono a questo proposito un'ampia scelta a seconda della roccia che dobbiamo riprodurre.

### **3.5 Lo *scaling* dei modelli**

La riduzione in scala del sistema geodinamico che si vuole riprodurre per arrivare al modello è una fase fondamentale nella progettazione di modelli analogici perché ne condiziona la costruzione, la deformazione, l'interpretazione e, soprattutto l'attendibilità dei risultati.

La teoria dei modelli in scala (BUCKINGAM, 1914; BRIGDMAN, 1931), è stata adattata a contesti geologici da K. Hubbert (1937, 1945, 1951), che l'ha fondata sul principio di costruire dei modelli la cui evoluzione strutturale è simile a quella degli originali naturali, anche se con grandezze e tempi molto ridotti. Ciò implica che tra il modello e il suo analogo naturale si stabiliscano delle relazioni, espresse da rapporti adimensionali, che permettono di ridurre della stessa quantità lunghezze, tempi e forze. Il modello e il suo analogo in natura, devono essere geometricamente, cinematicamente e dinamicamente simili.

#### **3.5.1 Criteri di somiglianza**

Geometricamente un modello è correttamente scalato quando le dimensioni di larghezza lunghezza e spessori o profondità sono ridotti della stessa quantità al momento di costruire il modello.

Per spiegare questo concetto basta guardare la Figura 3.4-A ; il model 1 è scalato geometricamente, infatti, tutte le dimensioni sono simili a quelle del suo corrispondente naturale, perché ridotte nelle stesse proporzioni. Al contrario, il model 2 non è geometricamente scalato perché la sua scala verticale è stata ridotta in misura minore rispetto a quella orizzontale. Se la somiglianza geometrica controlla le dimensioni del modello, la somiglianza cinematica controlla la dimensione tempo. Quest'ultima infatti, garantisce che la scala temporale dell'esperimento sia adeguata, in ogni momento, alla durata del fenomeno che si sta studiando nella realtà. Perché avvenga questo, il modello e il suo corrispondente naturale devono mantenersi geometricamente simili

durante l'intera deformazione. Il model 1 (Figura 3.5) è cinematicamente simile al suo equivalente in natura perché a intervalli di tempo (ore) corrispondenti a quelli naturali (Ma), possiede le stesse geometrie. Invece il model 2 non è scalato cinematicamente perché raggiunge la geometria b dopo tre ore (corrispondenti a tre Ma), mentre nella realtà ciò accade dopo due Ma.

Il criterio di somiglianza cinematica richiede che le varie forze, pressioni (*stress*) e resistenze (*stress*) agenti nella realtà, debbano essere scalate al modello riducendole tutte della stessa quantità. Come osservato da Hubbert (1937), affinché un modello e il suo corrispondente naturale siano cinematicamente simili, è sufficiente che siano dinamicamente simili. Infatti, solo se applichiamo al modello forze che siano ridotte tutte nella stessa proporzione rispetto alla realtà, siamo sicuri di avere le stesse geometrie dopo intervalli di tempo corrispondenti.

Il model 1 (Figura 3.4-B) è dinamicamente simile al prototipo naturale perché tutti gli sforzi, rappresentati dalle frecce, sono proporzionalmente simili a quelli reali, e sono ridotti della stessa quantità. Al contrario, nel model 2, il fattore di scala varia per i differenti tipi di sforzi, infatti gli sforzi di taglio sono stati ridotti di più dello sforzo complessivo orizzontale (vedi lunghezza delle frecce).

Il metodo migliore sarebbe quello di ridurre in scala tutte le forze agenti sul sistema naturale per assicurare al modello una somiglianza d'evoluzione quasi totale. In pratica però è impossibile racchiudere in una *sandbox* tutta la complessità di un sistema reale; in ogni caso in laboratorio è possibile riprodurre i parametri (sforzi tettonici e gravitazionali, resistenza delle rocce) che in natura contribuiscono in modo significativo alla deformazione.

Riassumendo, i criteri di somiglianza geometrica, cinematica e dinamica insieme a quello di somiglianza reologica, costituiscono la base dei processi di *scaling*.

Per calcolare il fattore di *scaling* occorre definire dei rapporti o equazioni adimensionali per applicarli ai diversi parametri. Questi rapporti, solitamente indicati con un asterisco (es.:  $L^*$ ), si ottengono dividendo il valore di un dato

parametro (es.: la lunghezza) nel modello (es:  $L_m$ ), per il suo valore in natura (es.:  $L_n$ )

$$L^* = L_m / L_n$$

Per esempio, se 1 cm di spessore in un modello rappresenta 1 Km nella realtà  $L^* = 10^{-2}m / 10^3 m = 10^{-5}$ , che rappresenta un fattore di *scaling* tipico per la maggior parte dei modelli. Stesso procedimento viene applicato agli altri parametri che rientrano nella costruzione di un modello: *stress* ( $\sigma^*$ ), *strain* ( $\epsilon^*$ ), tempo ( $t^*$ ), coefficiente di viscosità ( $\eta^*$ ) e tutti quelli che derivano da essi ( es.: velocità di deformazione e resistenza dei materiali)

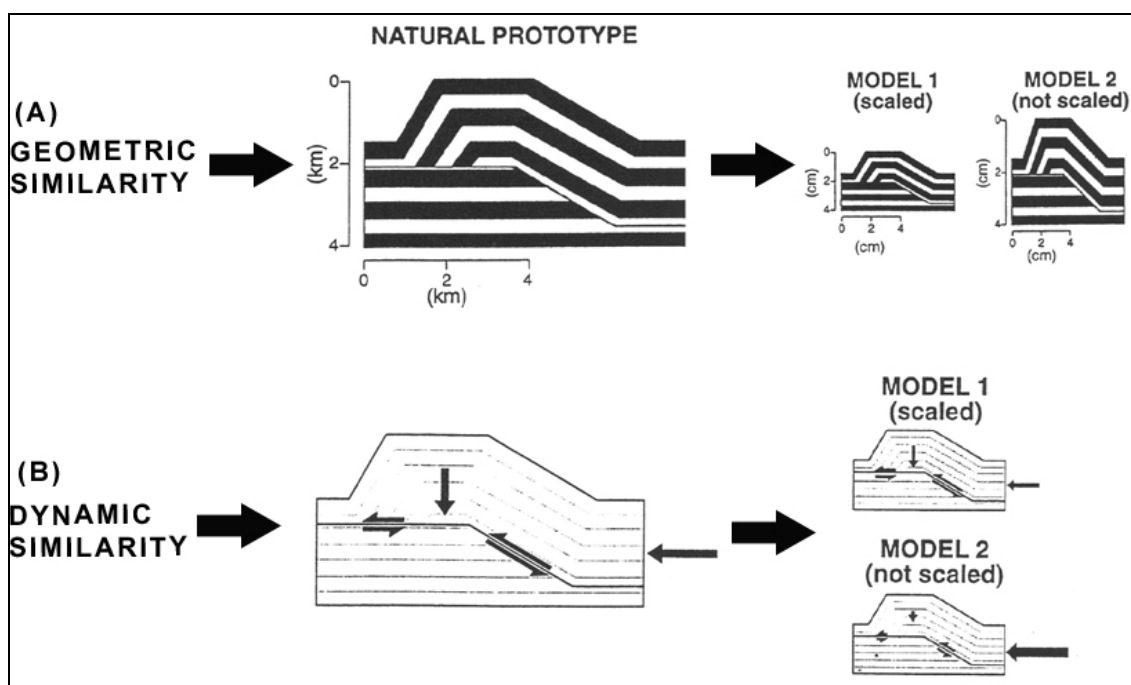


Figura 3.4. (A) Somiglianza geometrica: il model 1 è geometricamente scalato perchè sia in scala verticale che orizzontale vengono rispettate le proporzioni. Il model 2, invece, non è geometricamente scalato perchè la scala verticale non è stata ridotta tanto quanto quella orizzontale.

(B) Somiglianza dinamica: Le frecce rappresentano le forze agenti sul sistema e la loro lunghezza rappresenta l'intensità. Il model 1 è dinamicamente scalato perchè tutti gli stress sono stati ridotti proporzionalmente. Il model 2 non è dinamicamente corretto perchè i diversi tipi di forza sono stati ridotti in modi diversi. (modificato da VENDEVILLE ET AL. 1995).

### 3.5.2 Dalla natura al modello

Il problema più significativo che i processi di *scaling* determinano è il mantenimento della giusta relazione tra dimensioni e resistenza.

La riproduzione di sistemi a grande scala, usando modelli a piccola scala, non si può raggiungere riducendo semplicemente le dimensioni dell'originale. Infatti, con la riduzione in scala, bisogna ridurre proporzionalmente anche la resistenza del materiale di modellizzazione. Se questo non viene fatto, il materiale sarebbe troppo resistente per le forze che gli sono state applicate, perché, mentre le forze sono state scalate dinamicamente, la resistenza del materiale non è stata ridotta, della stessa quantità (VENDEVILLE ET AL. 1995).

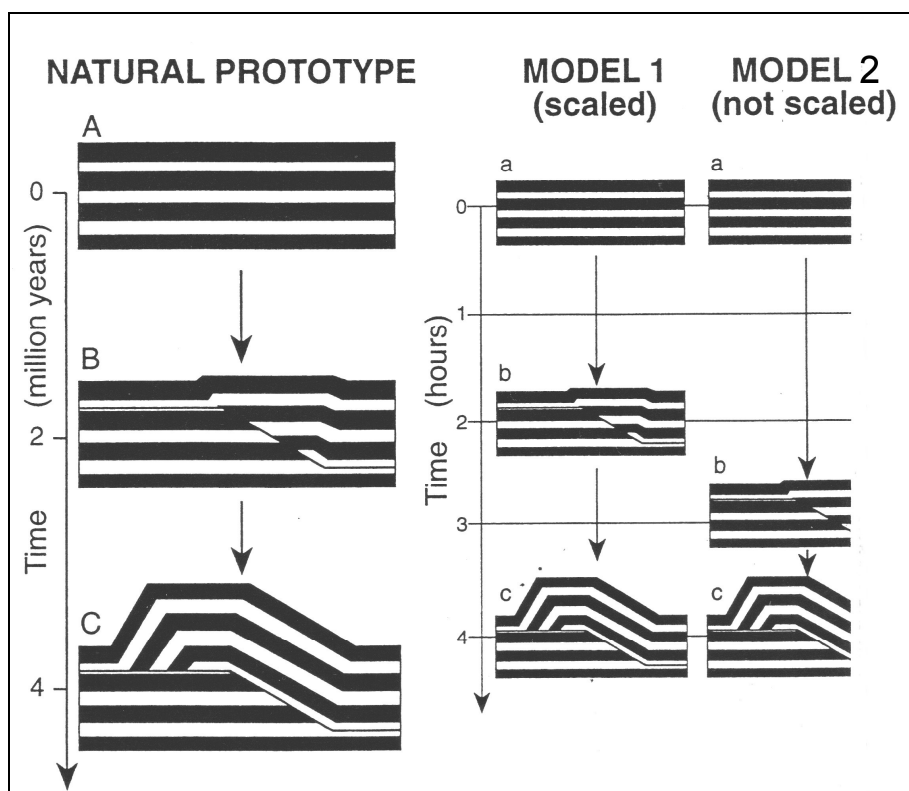


Figura 3.5. Somiglianza cinematica: il model 1 è cinematicamente scalato perché le sue geometrie e i suoi stadi evolutivi coincidono con quelli del prototipo naturale, a intervalli di tempo corrispondenti. Il model 2 non è cinematicamente scalato perché si trova nello stadio b al tempo 3, mentre il prototipo naturale raggiunge lo stadio B al tempo 2 (VENDEVILLE ET AL. 1995).

## Cap. IV

# IL NUOVO BANCO DI MODELLISTICA

### 4.1 Introduzione

Sin dagli inizi della modellistica analogica, uno dei problemi più importanti è stato quello dell'acquisizione dei dati durante le deformazione dei modelli. L'acquisizione dei dati consiste essenzialmente nella raccolta di informazioni che poi saranno utilizzate per la fase di studio del modello; queste informazioni, rappresentate da misure fisiche (tempi, velocità, accelerazioni) e da misure geometriche (spessori, angoli) devono essere accuratamente rilevate durante tutto il procedere della deformazione. Le esigenze prioritarie che si pongono al modellizzatore sono quelle di avere dati il più precisi possibili in quanto, lavorando a scale ridotte si deve cercare di ridurre al minimo l'errore che se scalato e applicato a grande scala non darebbe risultati accettabili. Il banco attuale nasce grazie ad un contratto di ricerca tra ENI S.p.a. e i dipartimenti di Scienze della Terra ed Ingegneria Industriale con i temi:

- (i) "Studio della tettonica del sale attraverso la modellizzazione analogica"
- (ii) "Sviluppo di tecniche di monitoraggio non distruttivo dell'evoluzione della superficie e di strati interni di modelli analogici usati per lo studio di formazioni geologiche".

Gli obiettivi primari sono stati:

- Sviluppo di un sistema automatizzato per il monitoraggio dell'evoluzione delle superfici deformate dei modelli analogici.
- Sviluppo di una tecnica di sondaggio non distruttivo dell'evoluzione dell'interfaccia sabbia silicene.
- Sviluppo di una tecnica per simulare il processo di sedimentazione attraverso sistema automatico a controllo numerico.

Fasi di lavoro del dottorato di ricerca

- Sviluppo e messa a punto di un nuovo banco di modellistica in grado di supportare implementazioni *hardware*. Obiettivo di questa fase dello studio è stata la messa in opera di un banco/prototipo con una struttura a componentistica modulare
- Sviluppo e messa a punto di un sistema automatico di acquisizione del top del modello, mediante scansione *laser*. Obiettivo di questa fase è stato il montaggio e il *setup* relativo di un primo *scanner laser* MEL
- Sviluppo e la messa a punto di un sistema automatico di acquisizione dell'interfaccia silicone-sabbia (*top* del silicone), mediante scansione *laser*. Obiettivo di questa fase è stato il montaggio e il *setup* relativo di un secondo *scanner laser* MEL
- Sviluppo messa a punto di un sistema automatico per la simulazione dei processi sedimentativi. Tali processi sono attualmente simulati mediante deposizione manuale della sabbia sul modello stesso. Obiettivo di questa fase dello studio è stata la definizione e la completa caratterizzazione di un prototipo funzionale di sedimentatore, in grado di depositare in modo automatico quantità calibrate di sabbia su aree definite del modello.
- Progettazione di un sistema per la misura e l'acquisizione degli sforzi presenti all'interfaccia parete mobile/modello, allo scopo di analizzare le relazioni esistenti tra lo stato tensionale interno e la formazione delle strutture deformative. Trattandosi di una funzionalità assolutamente innovativa, la mancanza di informazioni riguardo l'entità e l'andamento degli sforzi trasmessi ha comportato la definizione di test specifici per la determinazione di questi dati essenziali e per la verifica di fattibilità del sistema.

## 4.2 Sviluppo e messa a punto di un nuovo banco di modellistica.

### 4.2.1 Introduzione

Il laboratorio di modellistica analogica è stato attivato presso il dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Parma all'inizio degli anni '90, i primi esperimenti vennero condotti mediante *deformation-rigs* a basso grado di automazione e integrazione. Essi erano costituiti da un piano d'appoggio sul quale erano posizionate le pareti di contenimento e la movimentazione della parete di spinta era realizzata tramite un sistema a vite senza fine. Oltre ai dati raccolti sul modello sezionato era acquisita l'evoluzione della deformazione tramite due fotocamere digitali.

La prima evoluzione sostanziale si ebbe con l'introduzione di pistoni pneumatici che permisero la movimentazione di due pareti di spinta contrapposte (Figura 3.1).

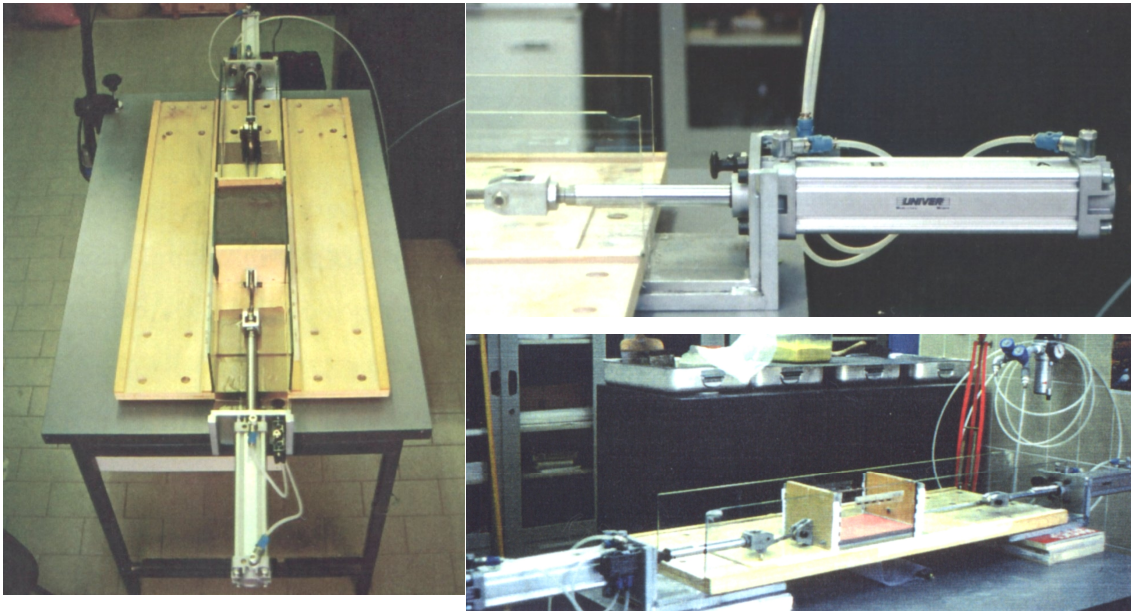


Figure 4.1 Deformation-rig

Grazie ad un contratto ENI-AGIP e ad un cofinanziamento COFIN si sono potuti reperire i fondi per iniziare e completare la realizzazione di un nuovo banco di modellistica.

Durante le primissime fasi in cui venivano raccolte le idee e le esperienze del gruppo di lavoro ci si è subito resi conto, che sul mercato non esisteva un prodotto che potesse realizzare tutte le nostre aspettative. Alla luce di queste esigenze si è proceduto alla realizzazione di un banco di modellistica che può essere definito un prototipo, per tutte le componenti che lo riguardano.

#### 4.2.2 Dimensioni del banco

Il telaio portante in alluminio è stato realizzato tenendo in considerazione le ridotte dimensioni del Laboratorio di Modellistica, che misura 5,70 x 3,80 metri, con una superficie utile pari circa 4 m<sup>2</sup>. La superficie utile è stata calcolata sottraendo all'area totale (circa 22 m<sup>2</sup>) le superfici dei piani di lavoro, del mobilio e la superficie per consentire all'operatore le normali attività. Partendo da questo dato si è progettato un banco con le seguenti misure:

altezza: 290 cm

larghezza: 120 cm

lunghezza: 220 cm

L'enorme vantaggio dato da un banco con queste caratteristiche è che è possibile costruire dei modelli con lunghezza compresa tra un minimo di 200 mm e un massimo di 1600÷2000 mm e una larghezza compresa tra un minimo di 200 mm e un massimo di 1000÷800 mm. Il vantaggio di poter disporre in un banco di lavoro con queste caratteristiche è facilmente riassumibile confrontando i modelli schematizzati nella Figura 4.2.

Infatti si può osservare, che se si dispone di un banco di modellistica piccolo e se si vuole modellizzare un sistema reale grande, per es. di 600x200x10 km, occorre applicare un fattore di *scaling* pari a  $3,3 \times 10^{-7}$ . Tale fattore di *scaling* non permette di avere uno spessore sufficiente ad analizzare le strutture che si formano durante la deformazione del modello. Al contrario, un banco di grosse dimensioni, consente di applicare fattori di *scaling* più piccoli (per es.  $3,3 \times 10^{-6}$ ) sufficienti per analizzare con precisione le strutture che si formano.

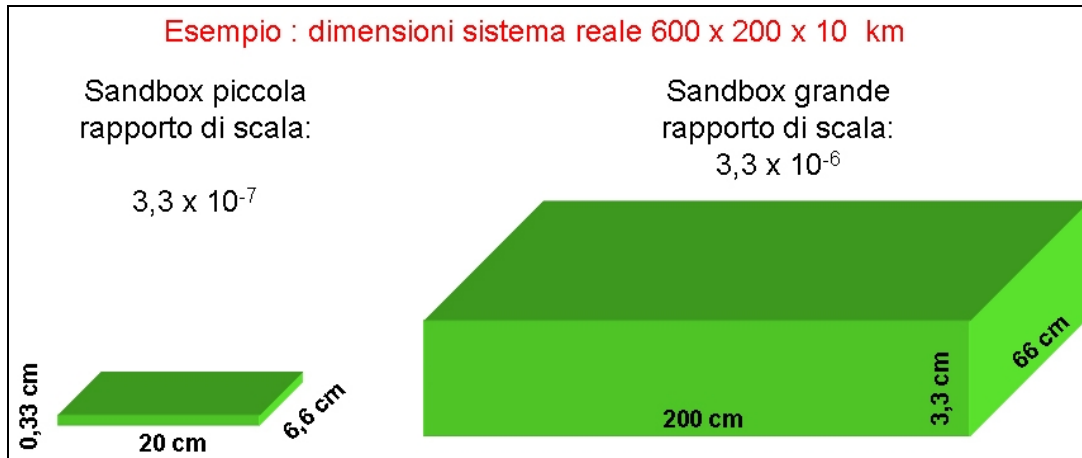


Figura 4.2 Scaling

### 4.2.3 Caratteristiche strutturali

I modelli vengono costruiti sul piano di lavoro di una struttura detta a “portale”, realizzata con profilati estrusi in alluminio (Figura 4.3). L'appoggio della struttura al pavimento del laboratorio viene realizzato attraverso piedi antivibranti allo scopo di smorzare le vibrazioni che il banco può trasmettere al modello (Figura 4.4).

Il piano di lavoro ha la caratteristica di poter essere inclinato fino ad un massimo di  $5\div 8^\circ$ ; ciò permette di riprodurre modelli di sistemi geodinamici reali, la cui superficie di base risulti inclinata, di tipo estensivo (margini passivi, fronti dei cunei orogenici e bacini di avanfossa).

Sul piano di lavoro, sono appoggiate 2 pareti regolabili di contenimento del modello, sigillate in modo da evitare fuoriuscite di sabbia e/o silicone. Queste due pareti in cristallo (Figura 4.5) sono montate su due telai in profilati di alluminio, a loro volta collegati al telaio mediante agganci regolabili. Le pareti laterali sono strutturate in modo tale da poter applicare delle regolazioni micrometriche, mediante viti, per adattarle in modo preciso al piano in cristallo (Figura 4.6). I telai delle pareti sono provvisti di due guide collocate nella parte superiore in cui, mediante cuscinetti a sfere, scorre la parete mobile di contenimento del modello (Figura 4.7; 4.8), collegata ad un motore mediante una vite senza fine, con la funzione di deformare il modello. Queste guide sono state progettate in modo tale da poter accogliere anche il nuovo sistema di livellamento della sabbia, tuttora in fase di completamento.

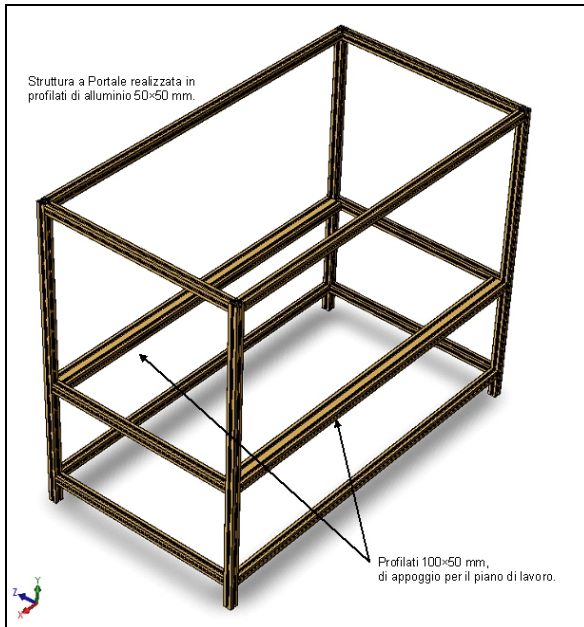


Figura 4.3 Struttura a portale del nuovo banco di modellizzazione

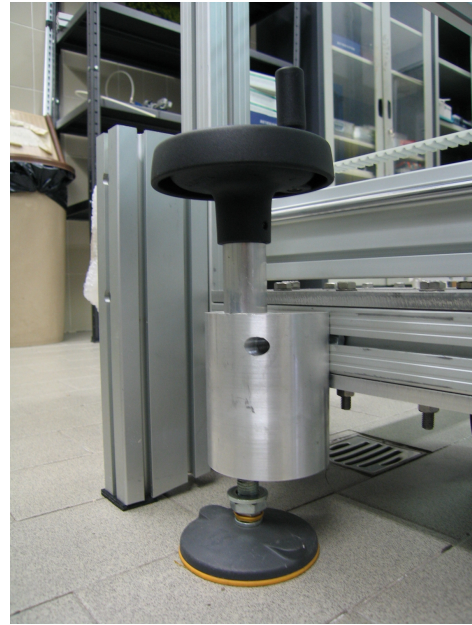


Figura 4.4 Piedi antivibranti



Figura 4.5. Pareti di contenimento laterale in cristallo

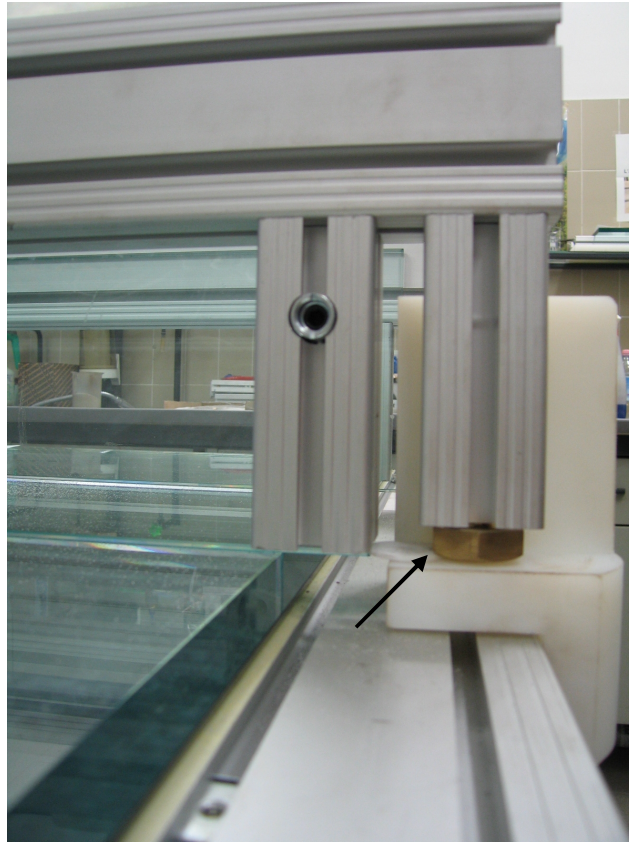


Figura 4.6. Sistema di regolazione delle pareti laterali

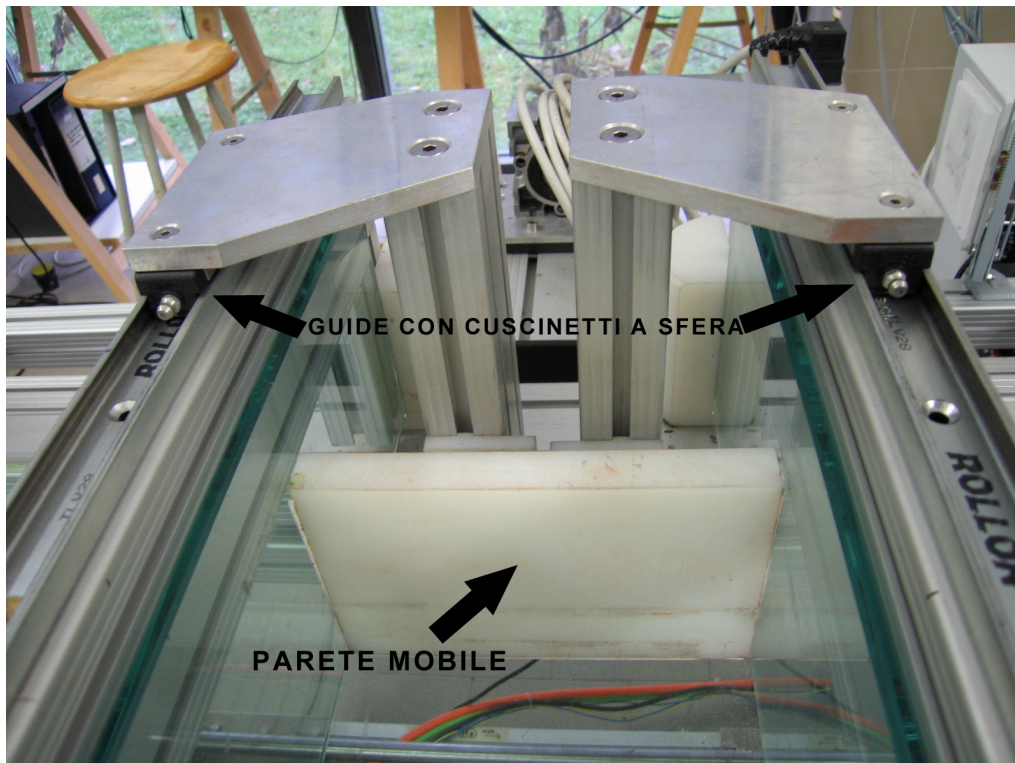


Figura 4.7. Parete mobile di contenimento del modello

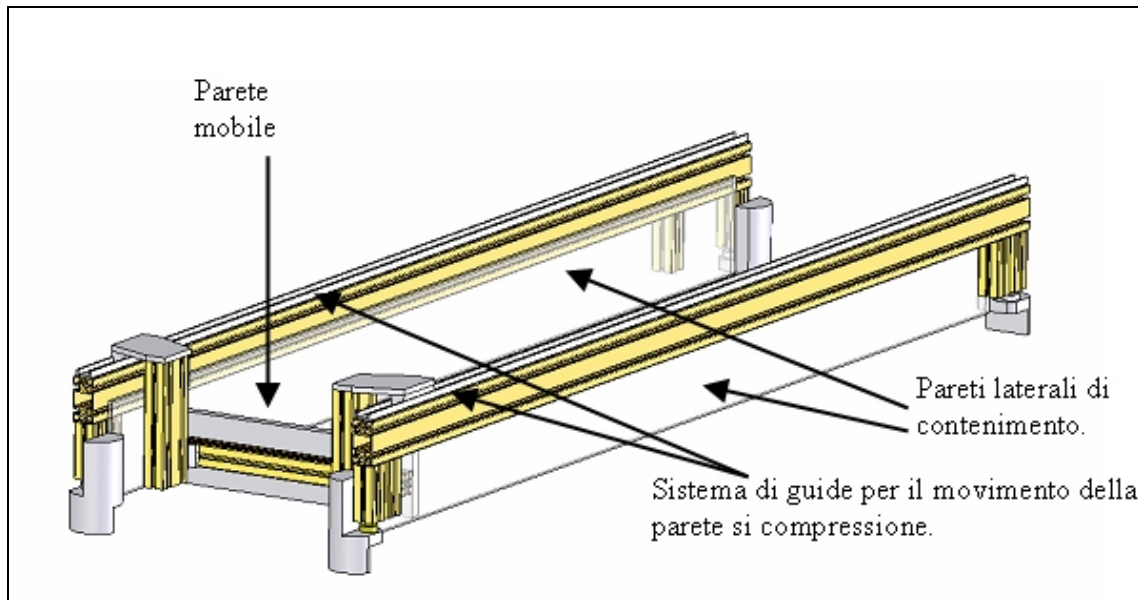


Figura 4.8. Parete mobile di contenimento del modello

#### 4.2.4 Sviluppo del banco

In seguito ai primi test e al montaggio di un sistema cartesiano a tre assi sono stati necessari alcuni adattamenti della struttura del banco per aumentare la rigidità complessiva. Tale operazione è stata necessaria ai fini di una migliore precisione di lavoro sia dello strumento *laser* per la *reverse-engineering* della superficie dei modelli, sia per un complessivo miglioramento delle prestazioni del banco stesso.

La struttura dalla versione iniziale è dunque stata irrigidita attraverso il montaggio di nuovi profilati d'alluminio. La struttura portante che risulta dopo l'operazione di irrigidimento è riportata in Figura 4.9. In particolare sono stati aggiunti longheroni orizzontali sia in corrispondenza del castello di appoggio del piano di modellazione, sia in corrispondenza del castello superiore, dove, come si vedrà in seguito è stato collocato il sistema cartesiano.

In corrispondenza degli innesti tra i profilati orizzontali con i profilati verticali sono state aggiunte squadre di rinforzo. Tali punti del telaio si sono in effetti rivelati particolarmente cedevoli, quando sollecitati dallo spunto del sistema cartesiano.

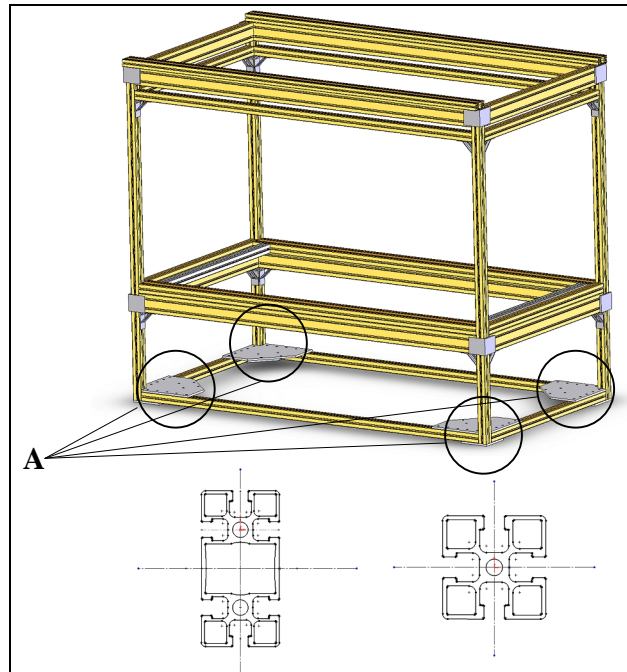


Figura 4.9 dettagli dell'irrigidimento strutturale

Un'ultima ottimizzazione ha riguardato i piedi della struttura. Ai fini di abbassare la distanza tra terreno e castello inferiore, opportune piastre triangolari (indicate con la lettera A in Figura 4.9), adeguatamente dimensionate, sono state montate, all'interno della struttura in corrispondenza dei suoi angoli. Su tali piastre sono state collocate le ruote per la movimentazione del banco, consentendo un notevole abbassamento della struttura. Queste modifiche hanno abbassato il baricentro del banco di circa 7 cm, diminuendo notevolmente fenomeni di inerzia delle masse durante il movimento dell'asse cartesiano.

In Figura 4.10, 4.11 sono riportati il disegno 3D e la foto della struttura, in Figura 4.12 schizzo definitivo della struttura portale.

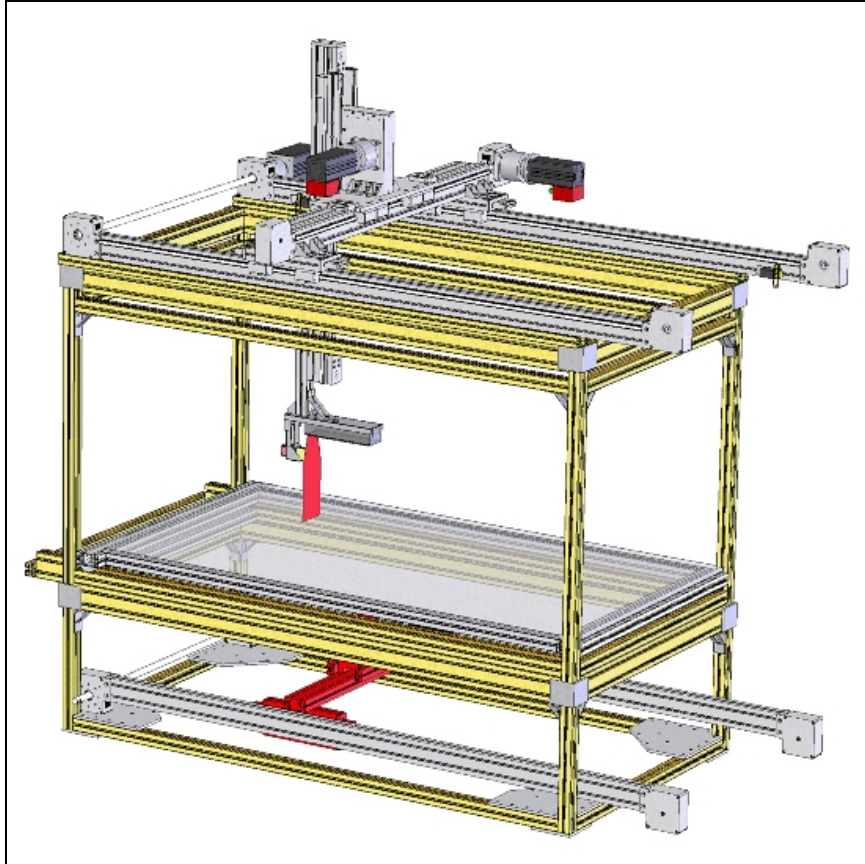


Figura 4.10. Disegno 3D del banco

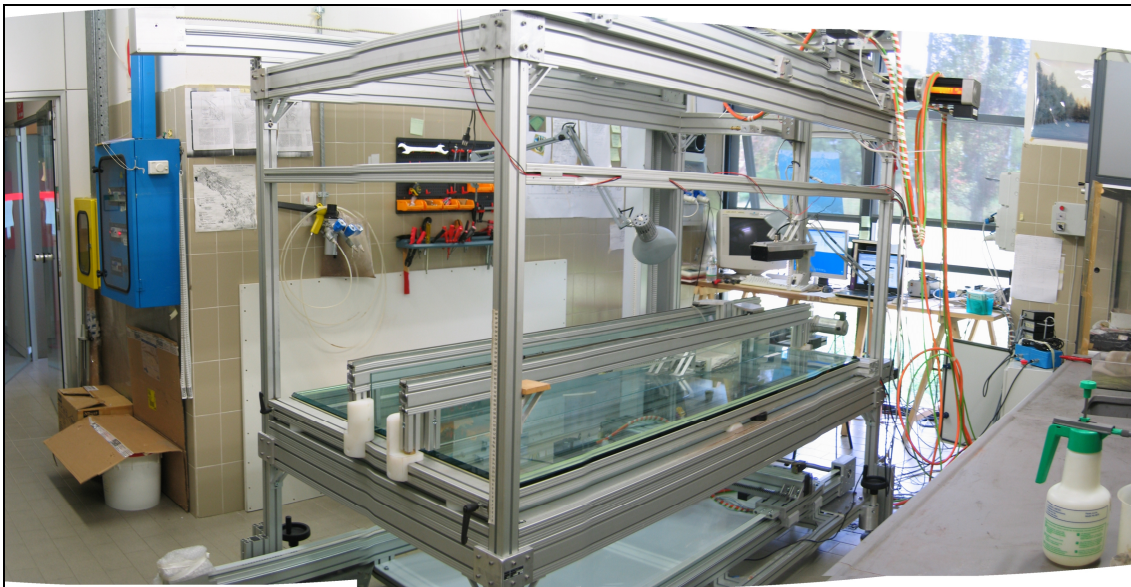


Figura 4.11. Banco di modellistica.

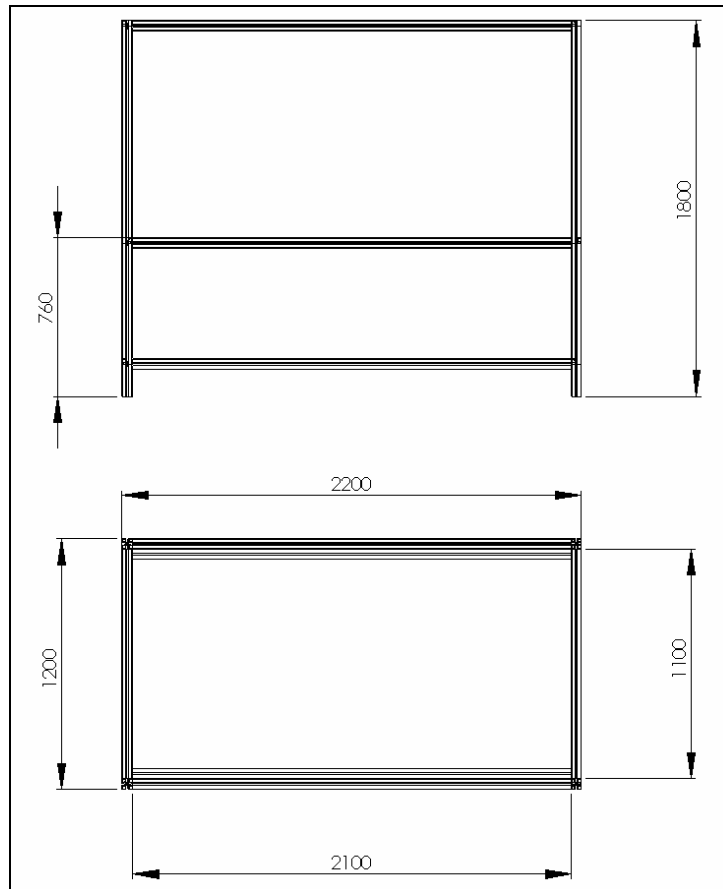


Figura 4.12 Schizzo della struttura

### 4.3 Sviluppo e messa a punto di un sistema automatico di acquisizione del top del modello, mediante scansione laser

#### 4.3.1 Introduzione

Un aspetto fondamentale per l'interpretazione e lo studio di ogni modello, riguarda l'acquisizione dei dati durante la deformazione. La tecnica più utilizzata nei laboratori di modellistica analogica è principalmente l'acquisizione foto-ottica mediante fotocamere digitali. Per comprendere meglio lo "stato dell'arte" sull'acquisizione dei dati nei laboratori di modellistica, è stata avviata una ricerca sulle tecnologie di acquisizione dati utilizzate dai laboratori mediante l'utilizzo di internet. Tale ricerca non ha dato risultati sufficienti e pertanto si è deciso di mettere in atto un sondaggio rivolto direttamente ai responsabili dei 27 laboratori fino a quel momento censiti. I risultati del sondaggio sono serviti per avere un'ulteriore conferma che l'acquisizione con la tecnica *laser*, oltre ad essere una tecnica molto innovativa permetteva al Dipartimento di Scienze

della Terra di porsi all'avanguardia tecnica nel panorama mondiale. Nella tabella a seguito sono descritte le principali tecnologie dei 13 laboratori di modellistica analogica che hanno aderito al sondaggio.

<u>Laboratorio</u>			<u>Tecnologia</u>		
<b>Denominazione</b>	<b>Ente di gestione</b>	<b>Stato</b>	<b>Laser</b>	<b>Fotografia</b>	<b>Video</b>
Physical Modelling Laboratory	Curtin University	Australia		x	
Département des Sciences de la Terre et de l'environnement	Université de Cergy-Pontoise	Francia		x	
Hans Ramberg Tectonic Laboratory	Uppsala University	Svezia		x	
Analogue Modelling Laboratory	Tectonic Research Group Dalhousie University	Canada		x	
Department of Earth Sciences	University of Ottawa	Canada		x	
Analogue modelling lab	University of Western Australia	Australia		x	x
Analogmodellierungslabor (analog modeling laboratory)	GeoForschungZentrum Potsdam	Germania		x	x
Laboratory of experimental tectonics	Dip. Scienze Geologiche Univ. Roma Tre	Italia	x	x	x
University of Toronto Tectonic laboratory (UTTTL)	University of Toronto	Canada	x	x	
Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie (LMTG)	Université Paul Sabatier – Toulouse III	Francia		x	
Structural Geology Laboratory	University of Pavia	Italia		x	x
Tectonic Modelling Laboratory	University of Bern	Svizzera		x	
Facility for Geodynamics	University of Maine	USA		x	x

Tab.4.1. Risultati di un'indagine su 13 laboratori

### 4.3.2 Tecniche di acquisizione

#### Acquisizione fotografica

Le fotocamere digitali vengono disposte in modo tale da poter monitorare e acquisire il top e i lati del modello in deformazione, le immagini vengono acquisite a tempi variabili in funzione della durata totale della deformazione. Fino al 2003, il laboratorio di modellistica del dipartimento era dotato di due fotocamere con una risoluzione di 1,3 Mpx, la memorizzazione delle immagini veniva effettuata direttamente sulla scheda di memoria (16 MB), che, data la bassa capacità di memoria poteva contenere un numero basso di immagini. Il problema di questo tipo di fotocamere era, appunto, la bassa capacità di memorizzazione, che veniva ovviata con *timelapse* lunghi (tempo tra uno scatto e l'altro) e ripetuti *download* (durante la deformazione) su pc delle foto memorizzate. Risulta evidente la scomodità di un tale sistema, che prevedeva, a tempi stabiliti, un arresto della deformazione per consentire l'operazione di download delle immagini. La possibilità di acquisire immagini ad alta definizione (5,0 Mpx) e a tempi ridotti (alcuni minuti) è stata realizzata mediante l'integrazione al banco di due fotocamere digitali di ultima generazione, che mediante cablaggio e *software* appropriato, permettono di memorizzare le immagini direttamente su pc.

#### Acquisizione mediante tomografia (TAC)

Questa tecnica, utilizzata nel laboratorio di Berna e in quello francese dell'IFP, ha l'enorme vantaggio che può eseguire vere e proprie TAC non distruttive all'interno del modello, permettendo di monitorare in ogni momento tutte le strutture che si formano all'interno di esso (Figura 4.13). Gli svantaggi principali di tale tecnica sono: il costo elevato dell'apparecchiatura (il gruppo di lavoro di Berna utilizza la TAC del vicino ospedale in orari notturni e con enormi difficoltà logistiche); la limitazione in larghezza della TAC permette di costruire modelli fino ad una larghezza massima di 20-25 cm.



Figura 4.13 TAC

### Acquisizione PIV

Presso i laboratori di modellazione analogica del *Tectonic Research Group* dell'università di Dalhousie (CA) e del *Geo Forschung Zentrum* dell'università di Potsdam (DE), l'evoluzione dei modelli è studiata tramite il sistema PIV (*Particle Imaging Velocimetry*), una tecnica che per mezzo di telecamere ad alta risoluzione e software specifici consente di risalire ai flussi di materiale (Figura 4.14) avvenuti in prossimità della superficie analizzata.

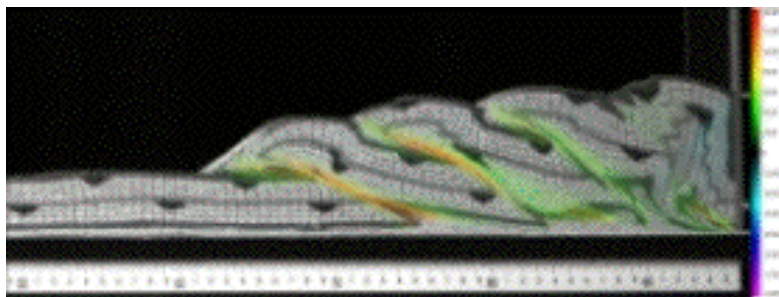


Figura 4.14 PIV

I metodi ottici per la misura di campi di velocità (*PIV-Particle Image velocimetry*; *PTV-Particle Tracking Velocimetry*, *Feature Tracking*), sono tecniche particolarmente potenti e flessibili che permettono di caratterizzare campi fluidodinamici con elevata risoluzione spazio-temporale. Il principio su cui si basano tali metodi, è particolarmente semplice e consiste nell'inseguimento di particelle e/o gradienti di luminosità attraverso due o più immagini successive. A valle di tale catena di misura, è possibile ottenere una descrizione Lagrangiana del campo di moto che permette uno studio diretto dei fenomeni di movimento.


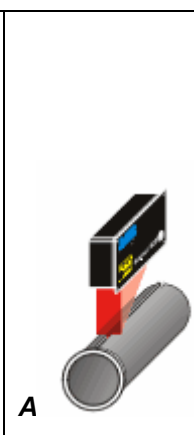

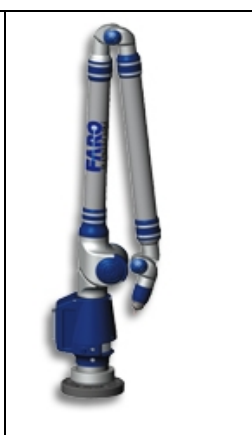
Per contro questo sistema permette, come tutti i sistemi foto-ottici, unicamente l'acquisizione di immagini superficiali.

### 4.3.3 Analisi e scelta delle soluzioni tecniche

In base agli obiettivi posti dal contratto di ricerca sono stati tracciati i requisiti funzionali necessari, ed in base a questi, avviata la fase d'analisi delle possibili soluzioni tecnologiche.

Da un'analisi delle soluzioni commerciali sono emerse numerose tecnologie per la *reverse-engineering* 3D di superfici e/o componenti meccanici. Le diverse tecnologie si basano su principi semplici per la definizione di nuvole di punti nello spazio corrispondenti alle superfici degli oggetti da riprodurre digitalmente. In generale si possono classificare in:

- Metodi ottici a triangolazione (Figura 4.15): attraverso immagini diverse prese da diversi punti di vista, si ricostruisce in modo tridimensionale la superficie dell'oggetto.
- Metodi *Laser* (Figura 4.16 A): attraverso uno o più fasci *laser* viene misurata la distanza tra superficie riflettente e sorgente luminosa, e viene ricostruita la nuvola di punti (x,y,z) della superficie dell'oggetto.
- Metodi combinati Ottico-*Laser* (Figura 4.16 B)
- Metodi a contatto (Figura 4.17): attraverso braccia meccaniche e tastatore si acquisisce punto per punto la superficie dell'oggetto da ricostruire.

	 	
<p>Figura 4.15 Metodo ottico</p>	<p>Figura 4.16 A Metodo laser Figura 4.16 B Metodo laser-ottico</p>	<p>Figura 4.17 Metodo a contatto</p>

Dall'analisi è emerso come ottimale il sistema *Laser* in virtù dell'elevata precisione e della adeguata velocità di misura. Per la movimentazione del sistema di scansione è stato adottato un sistema cartesiano a 3 assi azionato da motori *brushless* con riduttore epicicloidale.

#### 4.3.4 Sensore laser

Esistono due differenti categorie di prodotti: un sensore puntuale di distanza ed un sensore bidimensionale di distanza.

Si è scelto il sensore bidimensionale in quanto permette di effettuare scansioni molto veloci. La velocità di scansione è importante per i modelli con substrato viscoso, in quanto, tali modelli, hanno velocità di deformazione in alcuni casi (elevato spessore di silicone e/o copertura, piano inclinato) molto alte. Il *laser* bidimensionale consente di restituire il profilo verticale *z* di un oggetto, lungo una linea di scansione (Figura 4.18 e 4.19).

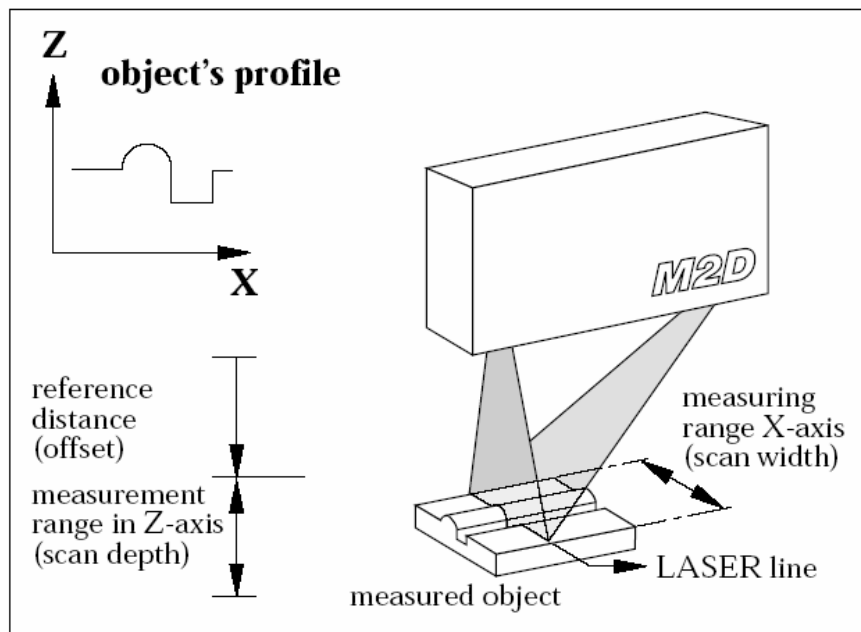


Figura 4.18. Schema di funzionamento del laser

Il principio di funzionamento dello strumento è il seguente.

Una sorgente *laser* emette un fascio luminoso che viene riflesso dalla superficie da misurare, il raggio riflesso incide su di un obiettivo che lo focalizza su una

telecamera CCD che digitalizza l'immagine riflessa (profilo riflesso) e la trasforma in due segnali di tensione: un primo segnale che indica la posizione lungo X, un secondo segnale che indica la distanza da misurare per il dato punto sull'asse X. In b sono inoltre schematizzate la parte ottica e la parte elettronica di condizionamento ed *output* del segnale. Le caratteristiche (velocità di scansione/acquisizione) dello strumento sono riassunte nella tabella 4.2, in funzione dei differenti modelli. Incognita principale all'applicabilità del laser al problema, è dovuto all'impiego dello stesso su una superficie sabbiosa.

Scanner M2D Typ	8/5 3*	10/13 4	15/10 2*	40/20 2*	50/30 1	60/30 2*	100/46 1	120/54 1	200/68 1	220/120 5*	1200/600 6	M2D-W 7*
Scan depth Z (mm)	8	10	15	40	50	60	100	120	200	220	1200	120
Scan width X (mm)	5	13	10	20	30	30	46	54	68	120	600	100
Reference distance (mm)	29	65	25	50	50	45	75	110	90	110	900	47
Resolution Z (mm)	0.03	0.04	0.06	0.10	0.15	0.16	0.25	0.30	0.5	0.60	3	0.3
Resolution X (mm)	0.03	0.04	0.04	0.06	0.10	0.10	0.16	0.20	0.2	0.36	2	0.3
Light source	LASER, 655 nm, 3 mW										655nm, 10 mW	
Shutter speed (sec.)	programmabile from 1/4000s bis 1/250s											
Laser protection class	3a										3b	
Scan rate, selectable	half frame 50 scans/s, full frame 25 scans/s											
distance outputs	0-10 V / EPP / PS2 / 4-20 mA optional											
Ambient light permitted	5000 Lux										10.000 Lux	
Expected lifetime	LASER-DIODE 50.000 h											
Maximum vibration	10 g, 1 kHz											
Operating temperature	0 bis +40°C / 32 bis 104°F										0 - 35°C**	
Storage temperature	-20 to +70°C / -4 to 158°F											
Humidity	< 90 % RH											
Protection class	IP 64											
Power supply	18 ... 28 V / 450 mA										18 ... 28 V / 800 mA	
Color of surface	white...black, shining, moderate reflecting											
Specials												***

Tabella 4.2 Caratteristiche del laser

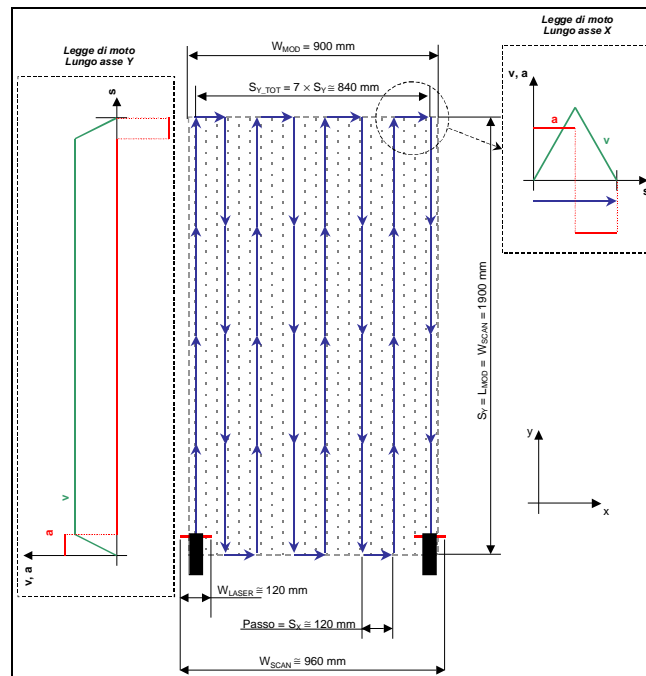
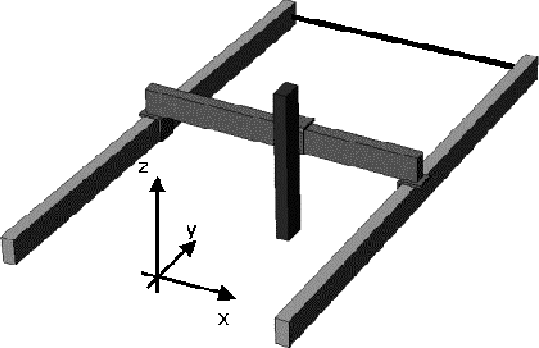


Figura 4.19 – Schema della traiettoria del sensore laser.

### 4.3.5 Sistema cartesiano del laser

Il sistema cartesiano adottato è a tre assi, ogni asse è montato e collegato al telaio mediante cuscinetti a sfera (Figura 4.20), il movimento è affidato a nastri dentati accoppiati a motori di tipo *brushless*, dotati di riduttori epicicloidali (gioco 15'). In tab 4.3 vengono riportate le caratteristiche del sistema cartesiano

 <p><i>Schema sistema cartesiano.</i></p>	<b>ASSE X</b>		
	Velocità MAX	m/s	1.5
	Accelerazione MAX	m/s <sup>2</sup>	4
	Corsa Utile	mm	900
	<b>ASSE Y</b>		
	Velocità MAX	m/s	2
	Accelerazione MAX	m/s <sup>2</sup>	10
	Corsa Utile	mm	1900
	<b>ASSE Z</b>		
	Velocità MAX	m/s	1.5
Accelerazione MAX	m/s <sup>2</sup>	4	
Corsa Utile	mm	500	

Tab. 4.3 Caratteristiche del sistema cartesiano

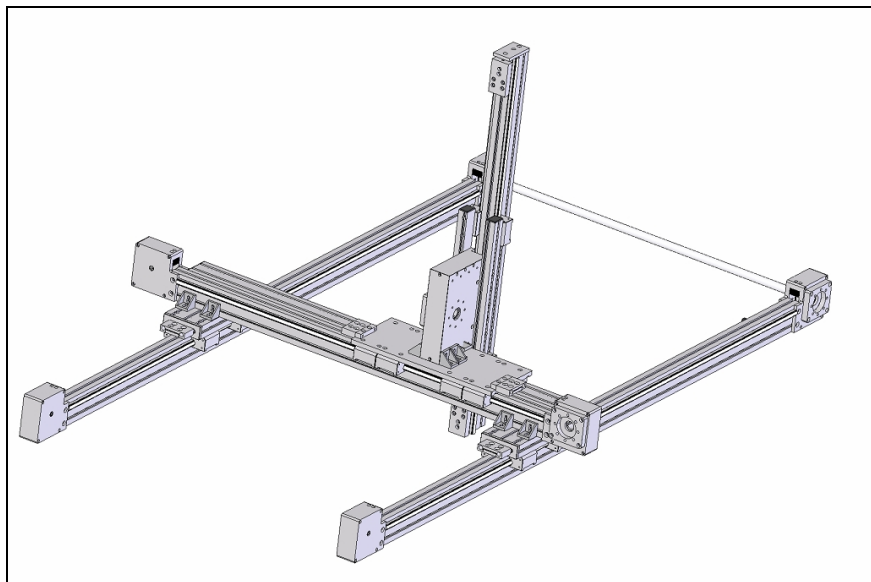


Figura 4.20 Sistema cartesiano

### 4.3.6 Software

Una consistente porzione del tempo di sviluppo è stata dedicata alla realizzazione di un interfaccia software integrata per il pilotaggio degli assi e l'acquisizione della mappa tridimensionale della superficie del modello.

Tale obiettivo è stato raggiunto realizzando, insieme all'Ing. Vettori del Dip. di Ingegneria Industriale di Parma, nell'ambiente di sviluppo visuale *Labview®*, un applicativo tramite il quale si possono controllare la movimentazione e le modalità di acquisizione dello strumento *Laser* (Figura 4.21). Sempre in ambiente *Labview®*, operano dei programmi che si occupano della post-elaborazione e del filtraggio dei dati raccolti in *real-time*, al fine di ottenere una matrice a 4 dimensioni contenete tutte le informazioni necessarie ad una corretta visualizzazione (Figura 4.22).

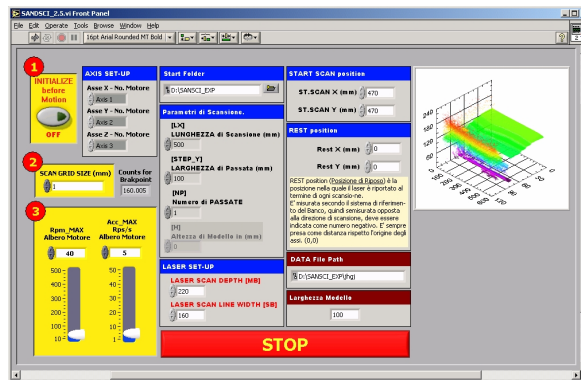


Figura 4.21

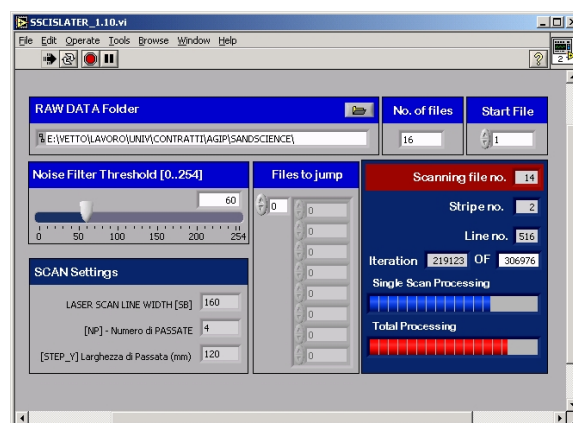


Figura 4.22

Il file ottenuto è in un formato compatibile con il *software Surfer®*, usato sia per la realizzazione delle immagini di presentazione (Figura 4.23), sia per l'analisi dei dati acquisiti.

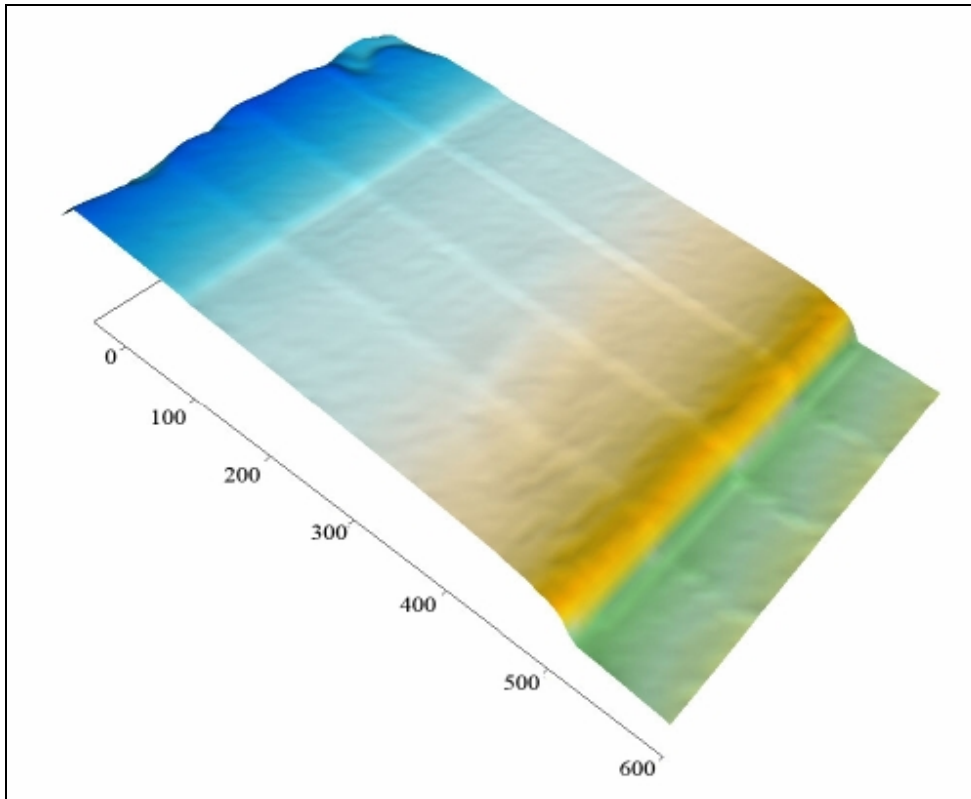


Figura 4.23 Immagine ottenuta dall'elaborazione dei dati mediante il programma Surfer®

La raccolta e l'elaborazione finale delle informazioni ha consentito di verificare che il banco sperimentale realizzato per il dipartimento di Scienze della Terra risulta essere tra i più evoluti in termini di integrazione e grado di automazione. L'apparato di modellizzazione è inoltre in grado di effettuare scansioni interne al modello, in quanto è stato montato un secondo sistema di scansione *Laser* che consente l'acquisizione del profilo della superficie inferiore all'interfaccia tra sabbia e silicone.

Questa caratteristica, assieme alle altre funzionalità realizzate durante il presente lavoro di tesi, distinguono ulteriormente il banco dell'Università degli Studi di Parma nel panorama mondiale.

## 4.4 Sviluppo e messa a punto di un sistema automatico di acquisizione dell'interfaccia silicone-sabbia

### 4.4.1 Introduzione

Per comprendere meglio l'evoluzione delle strutture tipiche di sistemi con presenza di sale (*diapiri*, *walls*, *tongues*, *overhangs* ecc.), i requisiti richiesti al sistema di monitoraggio sono i seguenti:

- realizzazione di una mappatura dell'evoluzione dei punti interni del modello all'interfaccia sabbia-silicone;
- scansione di tipo puntuale o continua con risoluzione paragonabile a quella del sistema *laser* superficiale;
- velocità sufficiente ad acquisire durante le fasi di evoluzione del modello;
- indagine di tipo non invasivo.

In base ai requisiti e sulla base di test preliminari condotti, tutte le tecniche basate sull'impiego di sistemi meccanici a contatto, sono state escluse.

Sono state prese in esame anche tecniche non distruttive, di tipo non a contatto quali la tecnica a *Raggi X*, la tecnica ad *Ultrasuoni*, la tecnica *Ecografica* e la tecnica *Laser*.

Tra tutte le soluzioni esaminate, la tecnica *Laser*, è quella che realizza il miglior compromesso tra risultati e costi di messa in opera e di funzionamento. La tecnica di funzionamento consiste nello sfruttare la caratteristica di trasparenza sia del cristallo sia del silicone. Il raggio *laser* emesso dallo strumento, attraversa i due materiali trasparenti e va a rilevare la superficie di contatto tra la sabbia di copertura e il silicone basale (Figura 4.24). Sfruttando uno strumento del tutto analogo a quello impiegato per il monitoraggio degli strati superficiali dei modelli, la tecnica *laser* presenta un solo inconveniente: l'incapacità di definire con precisione le geometrie di strutture di tipo *over-hang*, ovvero quelle strutture che presentano regioni in ombra rispetto lo strumento (si veda Figura 4.25).

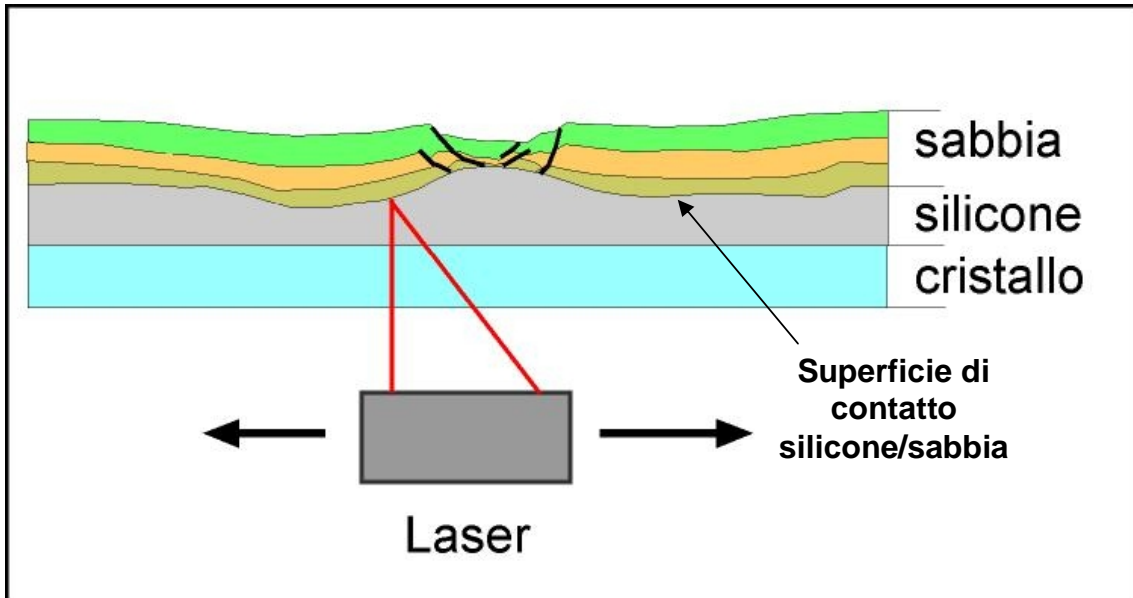


Figura 4.24 Principio di funzionamento del laser

Un inconveniente della misura *laser* è la necessità di tarare la lettura dello strumento, in funzione del mezzo attraverso il quale la lettura stessa è fatta. Se in condizioni normali di utilizzo, lo strumento permette direttamente la misura attraverso l'atmosfera (l'aria), in presenza di vetro e silicone, come ulteriori mezzi che il fascio deve attraversare, comporta una deviazione del fascio stesso, che si riscontra come una distorsione della lettura.

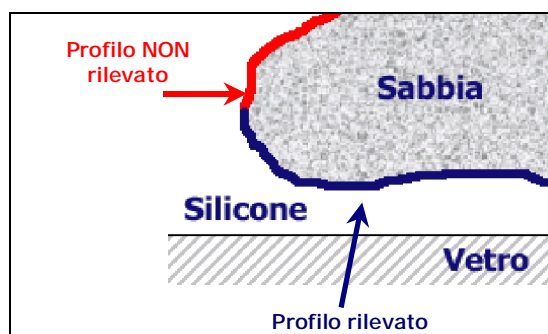


Figura 4.24 – Sottosquadro.

La successiva sezione è dedicata alla definizione analitica del problema della lettura *laser* attraverso il silicone. Sono inoltre descritte le fasi di progettazione e di realizzazione di un adeguato test pilota finalizzato a verificare la possibilità di

effettuare la taratura dello strumento *laser* per la misura attraverso vetro e silicone. Questo permette, con procedimento inverso, di risalire alla geometria reale del profilo in misura, a partire dalla mappatura apparente che lo strumento *laser* produce in presenza di vetro e silicone.

#### 4.4.2 Benchmark quantitativo per la verifica di funzionamento della tecnica a scanner laser nel monitoraggio del profilo di interfaccia sabbia-silicone.

##### Trattazione teorica.

Il silicone che forma il primo strato del modello ha proprietà di trasparenza alla luce visibile abbastanza buone, in via del tutto teorica il fascio *laser* dello strumento è quindi libero di attraversarlo per riflettersi all'interfaccia con la sabbia.

Alcuni esperimenti realizzati, avevano dimostrato la fattibilità della scansione del primo strato di sabbia ma, come previsto in base alle teorie dell'ottica, avevano evidenziato la necessità di definire un algoritmo per correggere i dati letti (taratura della lettura attraverso vetro e silicone).

Il problema nasce dal fatto che vetro e silicone presentano un indice di rifrazione diverso da quello dell'aria. Il raggio *laser* dunque, attraversando le superfici di interfaccia aria-vetro, vetro-silicone, subisce una doppia deviazione della sua traiettoria, in base alla legge di Snell (Figura 4.26):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

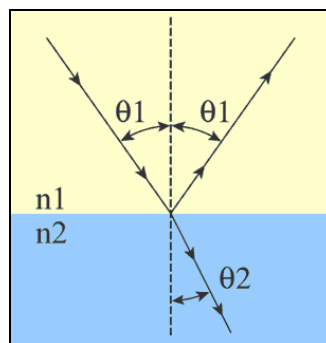


Figura 4.26

Il fenomeno della rifrazione del raggio *laser*, nel caso della lettura attraverso uno strato di sabbia e di silicone è schematizzato in Figura 27 (a) e (b).

Il raggio incidente, che viene emesso dallo strumento *laser*, essendo incidente in modo ortogonale alle superfici di interfaccia, non risulta deviato. Il raggio riflesso, che è il raggio letto dal sensore CCD dello strumento *laser* risulta invece deviato.

L'apparecchio, essendo tarato per funzionare in aria, restituisce il valore:  $Z_{app}$ , e "non si accorge" della presenza di vetro e silicone.

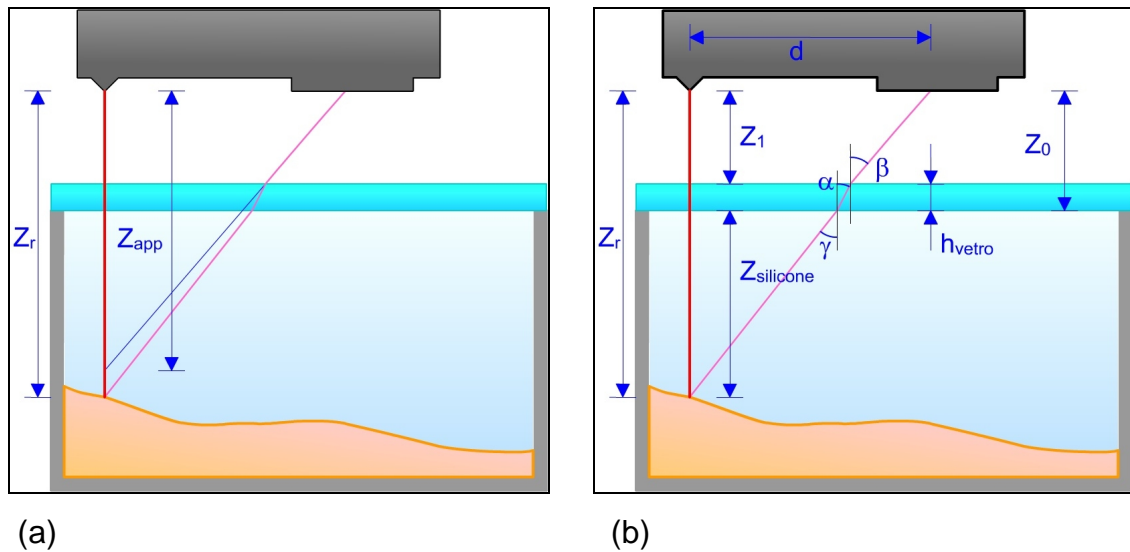


Figura 4.27 Rifrazione del raggio laser

La legge di Snell per la configurazione rappresentata assume la seguente forma

$$n_a * \sin b = n_v * \sin a = n_s * \sin g$$

Il valore di  $Z_{app}$  è strettamente collegato al valore di  $d$ . Per essere in grado di interpretare la  $Z_{app}$  si deve prima calcolare la distanza  $d$ .

$$d = Z_{sill} * tgg + h_{vetro} * tga + Z_1 * tgb$$

e usando la formula di Snell si arriva a:

$$d = Z_{sill} * tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_s} \right) \right] + h_{vetro} * tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_v} \right) \right] + Z_1 * tg b$$

La distanza  $d$  è interpretata dallo strumento come distanza apparente  $d_{app}$ .

$$d_{app} = Z_{app} * tg b$$

Così si riesce a collegare la lettura  $Z_{app}$  allo spessore del silicone  $Z_{sill}$

$$Z_{app} = \frac{Z_{sill} * tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_s} \right) \right]}{tg b} + \frac{h_{vetro} * tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_v} \right) \right]}{tg b} + \frac{Z_1 * tg b}{tg b}$$

$$Z_{app} = Z_{sill} \frac{tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_s} \right) \right]}{tg b} + h_{vetro} \frac{tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_v} \right) \right]}{tg b} + Z_1$$

Considerando le costanti

$$K = \frac{tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_s} \right) \right]}{tg b} \quad K_{primo} = \frac{tg \left[ \arcsin \left( \frac{\sin b}{n_v} \right) \right]}{tg b}$$

risulta

$$Z_{app} = Z_{sill} * K + h_{vetro} * K_{primo} + Z_1$$

In questo modo si riesce a collegare la  $Z_{app}$  di lettura allo spessore del silicone

$Z_{sill}$

Considerando che

$$Z_r = Z_{sill} + h_{vetro} + Z_1$$

Risulta

$$Z_r = Z_1 + h_{\text{vetro}} + \frac{Z_{\text{app}} - h_{\text{vetro}} * K_{\text{primo}} - Z_1}{K}$$

Da un punto di vista puramente teorico, è dunque possibile calcolare l'errore di *offset* ma ci si scontra con la difficoltà del definire con precisione le costanti  $K$  e  $K_{\text{primo}}$  che sono in relazione agli indici di rifrazione  $n_s$  del silicone e  $n_v$  del vetro.

Se per il vetro è possibile individuare l'indice di rifrazione dalla bibliografia, per il silicone in uso è più difficoltoso recuperare informazioni di carattere ottico.

Per evitare una taratura basata su dati bibliografici, è stata progettata e realizzata una prova pilota per la taratura della lettura attraverso vetro e silicone. Obiettivo del modello pilota è quello di individuare opportuni coefficienti di correzione per il confronto diretto tra due letture di una stessa superficie, una in aria ed una in presenza di vetro e silicone.

### **Test pilota.**

Data la mancanza di dati certi sulle proprietà ottiche del silicone in uso, è stato progettato e realizzato un modello pilota per taratura preliminare della lettura con strumento *laser* della superficie di sabbia, attraverso silicone e vetro.

A tal fine si è pensato di realizzare un modello di sabbia con strutture che siano il più possibile simili alle strutture tipiche di un modello analogico. Il modello di sabbia è stato poi successivamente solidificato attraverso soluzione di colla di pesce. Il modello è stato costruito all'interno di una scatola di dimensioni 313x113x50 mm.

Al fine di verificare la lettura dello strumento *laser* in presenza di strutture particolari, tipiche dello strato di interfaccia sabbia silicone, sono state realizzate artificialmente nel modello due strutture diapiriche. La prima struttura è di tipo

esclusivamente verticale mentre la secondo ha uno sviluppo sia verticale che orizzontale, ovvero ha una struttura di tipo *over-hang*.

Al fine di realizzare una superficie riscontro/riferimento per le operazioni di taratura due superfici verticali sono state ricavate sul modello. Dette superfici sono state realizzate a filo della scatola di contenimento, in modo tale che sopra di loro non vi si depositi alcuno strato di silicone, e durante la lettura risultino dunque esclusivamente coperte dal vetro.

In Figura 4.28 è riportata una foto del modellino artificiale realizzato, con indicazione delle strutture descritte.

Sul modello così realizzato sono state effettuate tre diverse scansioni.

La prima scansione è stata fatta solo sul modello, in assenza di silicone e vetro, nella configurazione riportata in Figura 4.28. In questo modo si sono acquisiti i valori di  $Z_R$ , ovvero la mappatura di riferimento della superficie, corrispondente alla misura reale della superficie del modello.

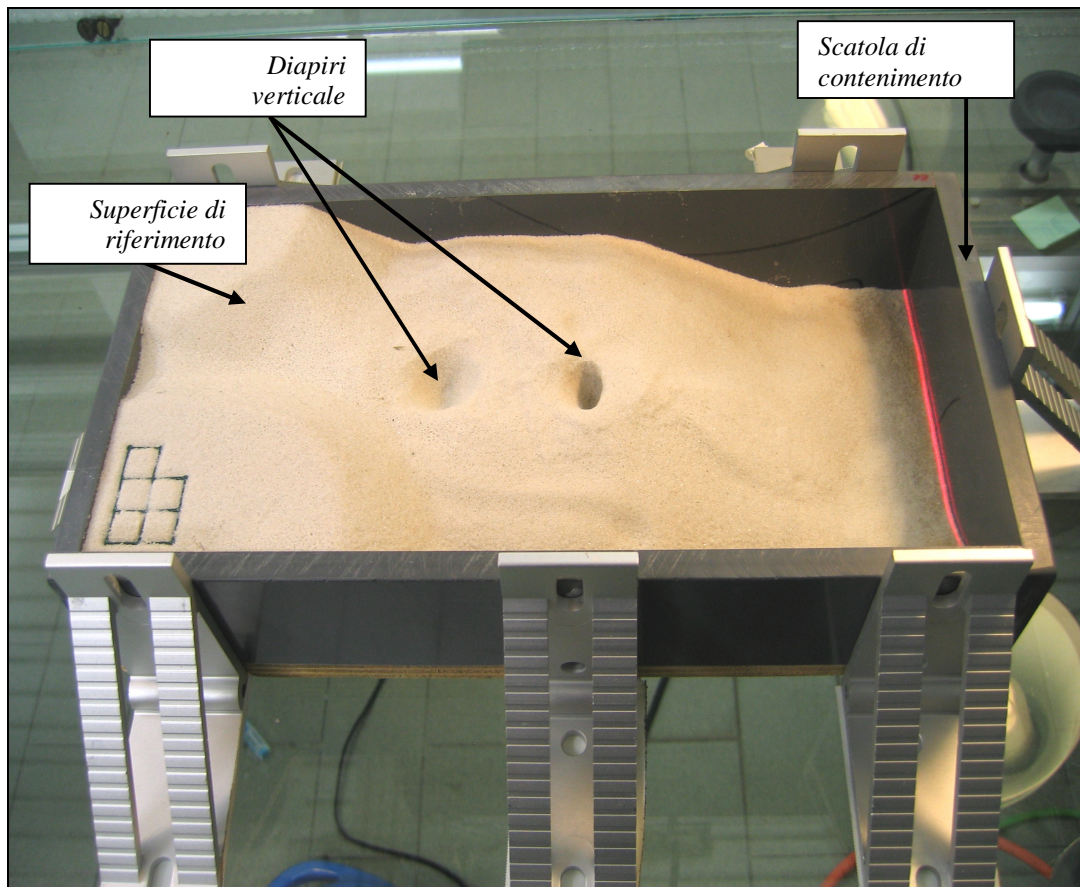


Figura 4.28 Modello pilota

La seconda scansione è stata fatta in presenza di silicone, Figura 4.29 In questa configurazione il silicone è depositato sul modello, in modo tale da riempire la scatola fino al suo orlo superiore.



Figura 4.29 Modello pilota riempito di silicone

La terza scansione è stata fatta sul modello completo, ovvero in presenza di sabbia, silicone e vetro (Figura 4.30) in questa scansione sono state registrate le  $Z_{app}$  del modello, ovvero la sua digitalizzazione apparente. A chiusura del modello, a contatto con il silicone è stata posta una lastra di vetro identica per materiale e spessore a quella con cui è realizzato il piano di appoggio del banco sperimentale.

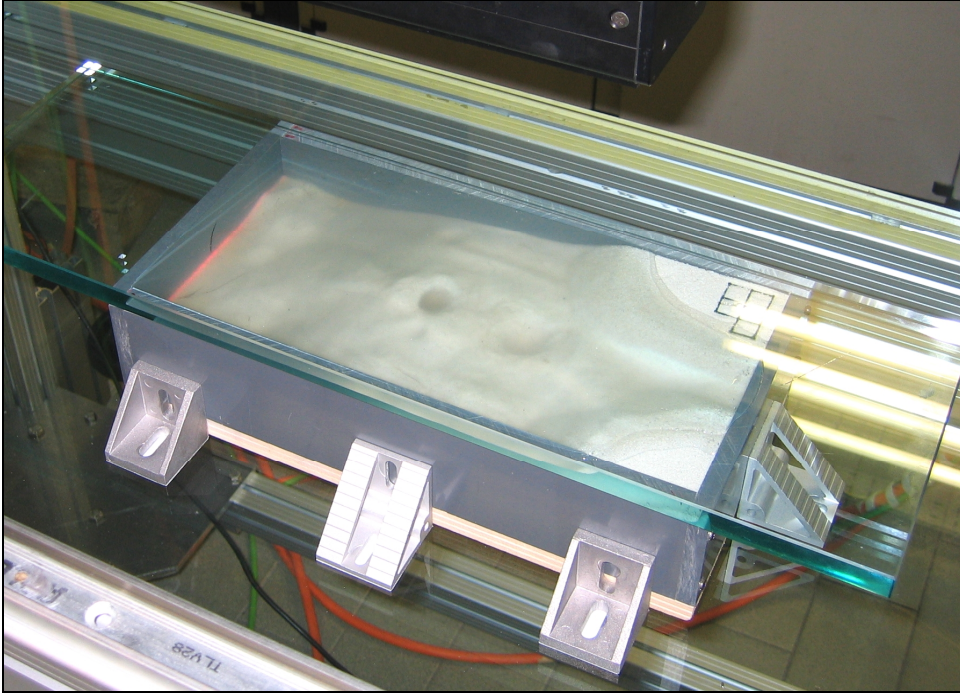


Figura 4.30 Modello pilota riempito di silicone con lastra di cristallo

Nella trattazione che segue, con l'indicazione  $Z_{zero}$  si intende la quota misurata dallo strumento *laser* in corrispondenza delle superfici di riferimento del modello, non bagnate dal silicone. Tale quota corrisponde alla quota  $Z_0$  indicata in Figura 4.27.

Prendendo in considerazione la configurazione del modello nella terza scansione e le lettere indicate in Figura 4.27, lo spessore del silicone risulta:

$$Z_{sil} = Z_R - Z_{zero}$$

$$Z_R = Z_1 + h_{vetro} + Z_{sil,R}$$

$$Z_{app} = Z_1 + h_{vetro} + Z_{sil,App} + Offset$$

Se si scompone la quota  $Z_{sil,App}$  nella sua componente reale (distanza effettiva dal sensore *laser*) e quella apparente legata alla deviazione, si può scrivere:

$$Z_{sill,App} = Z_{sill,R} + Dev_{sil}$$

Che sostituita nella precedente porta all'espressione:

$$Z_{app} = Z_1 + h_{vetro} + Z_{sill,R} + Dev_{sil} + Offset$$

dove la deviazione totale subita dalla misura è scomposta nelle due componenti:  $Dev_{sil}$  è la componente di deviazione causata dal silicone e  $Offset$  è la parte di deviazione del vetro, che è costante.

Si continua supponendo che la deviazione che il silicone provoca sia proporzionale allo spessore del silicone stesso e quindi:

$$Z_{sill,App} = Z_{sill,R} + Z_{sill,R} * K$$

$$Z_{app} = Z_1 + h_{vetro} + Z_{sill,R} * (1 + K) + Offset$$

In questa formula osserviamo la presenza di una parte costante

$$COST = Z_1 + h_{vetro} + Offset$$

pertanto

$$Z_{app} = Z_{sill,R} * (1 + K) + COST$$

Nello stesso tempo è possibili scrivere anche la seguente relazione:

$$Z_R = Z_{sil,R} + h_{vetro} + Z_1.$$

Tenendo conto del fatto che

$$Z_{sill,R} = \frac{Z_{app} - Z_1 - h_{vetro} - Offset}{1+K};$$

$Z_R$  prende la seguente forma:

$$Z_R = \frac{Z_{app}}{1+K} - \frac{h_{vetro} + Z_1}{1+K} - \frac{Offset}{1+K} + (h_{vetro} + Z_1)$$

$$Z_R = \frac{Z_{app}}{1+K} + \frac{-(h_{vetro} + Z_1) + (1+K) * (h_{vetro} + Z_1)}{1+K} - \frac{Offset}{1+K}$$

$$Z_R = \frac{Z_{app} + K * (h_{vetro} + Z_1) - Offset}{1+K}$$

$$Z_R = \frac{Z_{app} + K * Z_0 - Offset}{1+K}$$

Anche in questa formula riusciamo a collegare  $Z_R$  a  $Z_{app}$  tramite costanti:  $Z_{zero}$ ,  $Offset$  e  $K$ . Questa impostazione ha il vantaggio che le prime due costanti sono facilmente rintracciabili dai dati che offrono le 3 scansioni.

Per la determinazione di  $K$  si analizzano i dati delle singole scansioni, attraverso un foglio di calcolo di *Excel*.

Attraverso la scansione sulla sola sabbia è possibile risalire alla quota  $Z_{zero}$  di riferimento, corrispondente alla distanza strumento – modello. Il calcolo della distanza è stato fatto facendo una media dei punti acquisiti in corrispondenza della superficie orizzontale piana creata sul modello. Il risultato è pari a

$$Z_{zero} = -76,592\text{mm}$$

L'influenza del vetro sulla lettura è quantificata invece in modo diretto attraverso un confronto tra seconda e terza scansione, tramite la differenza

$$Z_{Sabbia+Silicone+Vetro} - Z_{Sabbia+Silicone}$$

$$Offset = Z_{Sabbia+Silicone+Vetro} - Z_{Sabbia+Silicone}$$

A causa dello spessore costante del vetro, l'*offset* introdotto è anch'esso costante. Il suo valore è stato mediato su tutti punti delle due scansioni, ed il risultato è pari a:

$$Offset = 7.13064mm$$

La misura è caratterizzata da una dispersione del 9%, legata al metodo ed alla natura stessa del modello. Tale errore risulterà decisamente ridotto nella fase di taratura fine che è stata effettuata direttamente sullo strumento *laser* posizionato al di sotto del banco.

In Figura 4.31 sono riportate, sovrapposte su di uno stesso sistema di riferimento le tre scansioni effettuate. Già da questo primo punto di vista è possibile apprezzare la definizione ottenuta dallo strumento *laser* anche in presenza di vetro e silicone. La griglia riportata sull'immagine è solo per evidenziare la struttura della superficie digitalizzata, e non corrisponde con la griglia dei punti acquisiti dalla strumento.

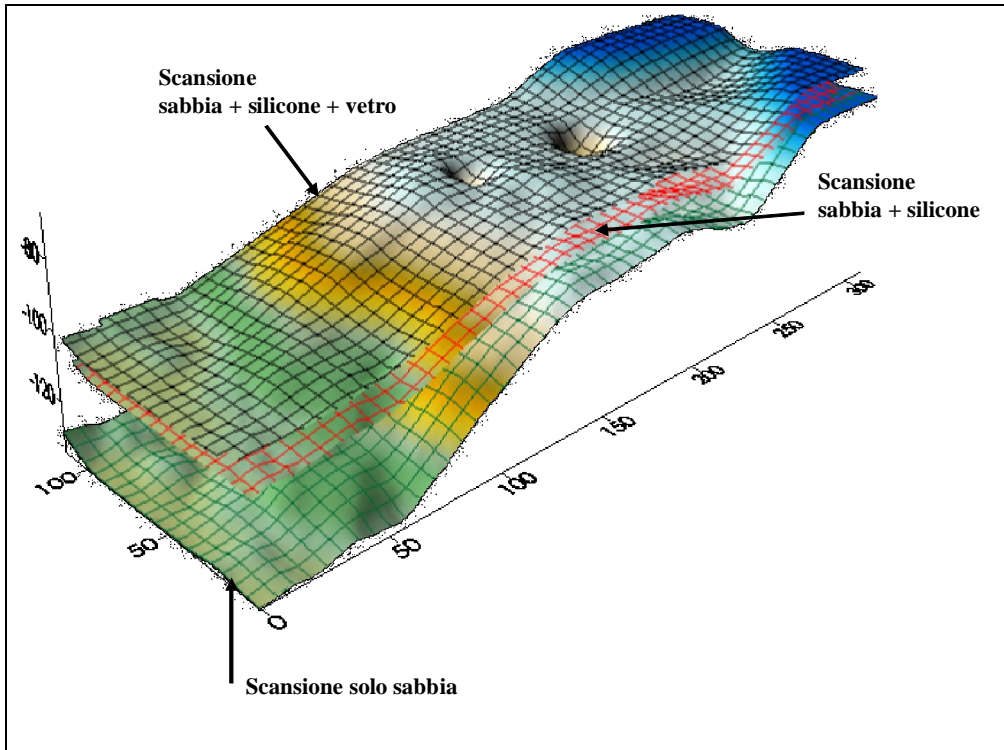


Figura 4.31 Superfici di scansione

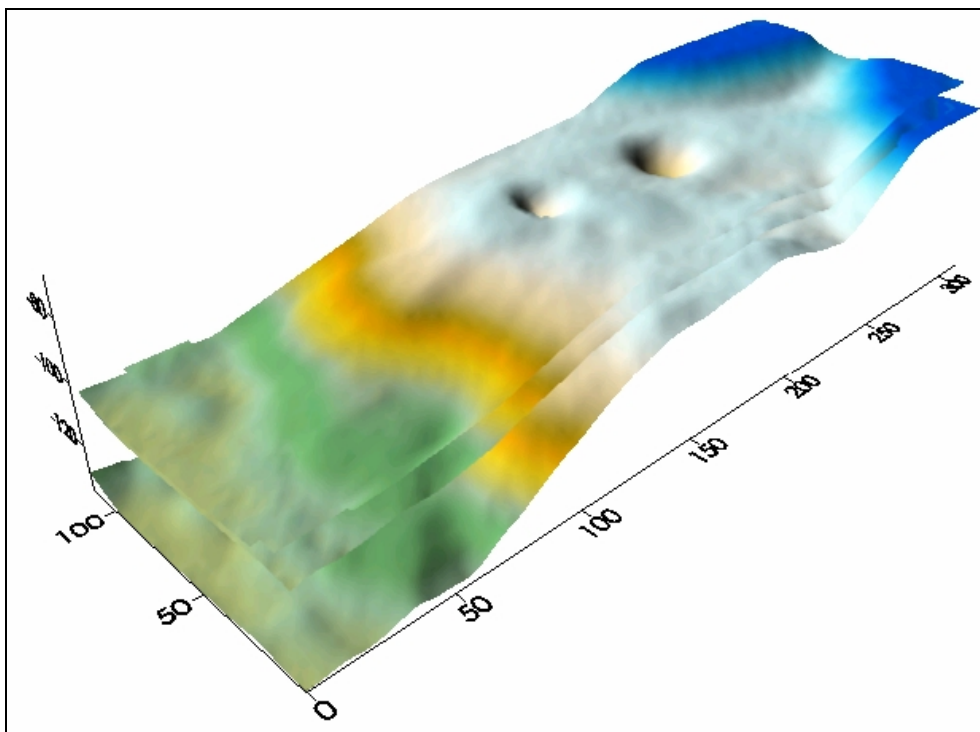


Figura 4.32 Superfici di scansione

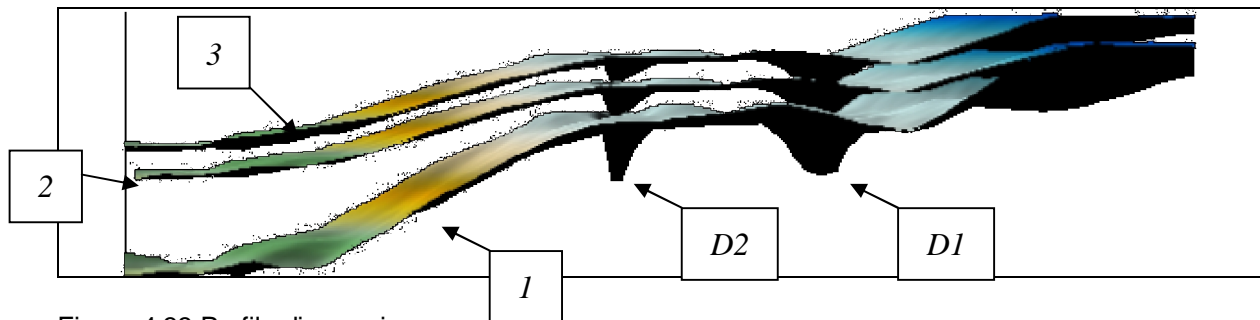


Figura 4.33 Profilo di scansione

Dalle Figura 4.32 e 4.33 è invece possibile apprezzare come anche il dettaglio delle strutture diapiriche risulti ben rivelato dallo strumento (n.b. Le immagini sono ribaltate).

Soprattutto dalla Figura 4.33, è possibile apprezzare sia gli effetti della presenza di sabbia, silicone e vetro, sia l'interpretazione che lo strumento dà alle diverse conformazioni delle strutture diapiriche.

Come si osserva tra le scansioni 1 e 2, che corrispondono rispettivamente alla scansione solo sabbia, ed alla scansione sabbia più silicone, è possibile ritrovare confermato il comportamento analiticamente previsto, ovvero assistere ad uno schiacciamento della lettura proporzionale allo spessore stesso di silicone, attraverso il quale, nel caso 2, è fatta la lettura stessa. Nel passare invece dalla scansione 2 alla scansione 3 si nota l'effetto di deviazione introdotto dal vetro, che agisce avvicinando in modo apparente la lettura allo strumento.

Per quanto riguarda invece le strutture diapiriche, indicate con D1 e D2 in Figura 4.33, la struttura D2 è quella a sviluppo verticale e si osserva come lo strumento sia in grado di descrivere pienamente la sua geometria, ovvero di riportare l'intera superficie di interfaccia sabbia-silicone. Considerando invece il diapiro D1, che corrisponde al diapiro con estensione sia verticale che orizzontale, si osserva come in corrispondenza dell'*over-hang* sia presente una superficie piana che si inserisce nella mappatura superficiale costituendone una discontinuità. Grazie a questa caratteristica, anche se non è possibile avere una descrizione completa della superficie del diapiro, è comunque possibile

individuare la presenza di una struttura di *over-hang*, grazie appunto alla discontinuità che si introduce nella mappatura della superficie.

In Figura 4.34 è invece riportato un grafico bidimensionale delle distanze lette in corrispondenza di una sezione della superficie del modello (sezione a 50mm dal bordo di riferimento del modello). In questa sezione risulta tagliato solo il diapiro verticale (quello senza *over-hang*), visibile nella scansione.

Anche da questa immagine è possibile apprezzare i diversi contributi di silicone e cristallo sullo schiacciamento complessivo della lettura dello strumento *laser*. E' visibile il "parallelismo" tra la situazione "Sabbia + Silicone + Vetro" e "Sabbia + Silicone", conferma del fatto che *Offset* è costante.

Si osserva anche che al crescere dello spessore di silicone il distacco tra le curve è maggiore.

L'influenza del silicone sulla lettura è quantificata tramite la differenza

$$Z_{Sabbia+Silicone} - Z_{Sabbia} .$$

Sapendo che il silicone riempie del tutto la scatola, il suo spessore è

$$Z_{Sabbia} - Z_{zero} .$$

La deviazione provocata dal silicone non è costante e si cercherà in seguito la costante  $K$ .

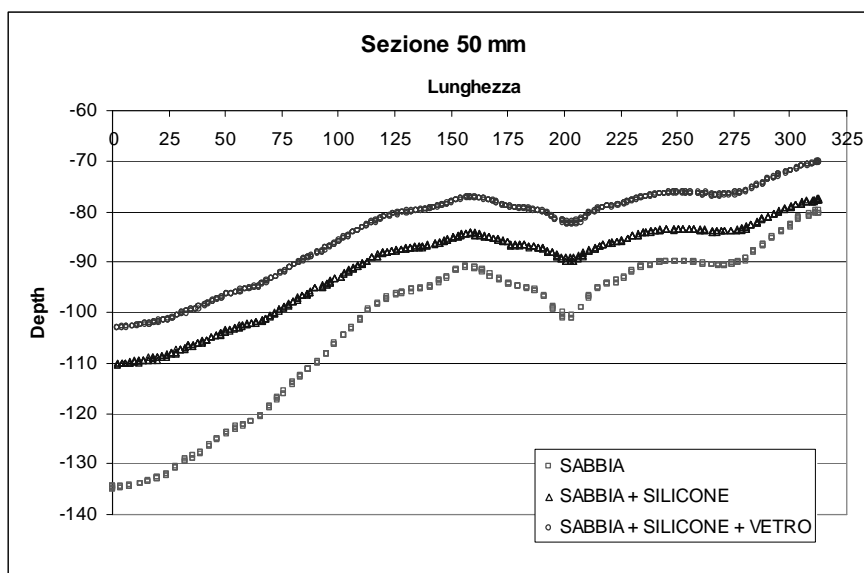


Figura 4.34 Grafico dei profili

In Figura 4.35 sono riportati i tracciati dell'effetto del silicone in ogni punto della lettura e quello relativo alla misura dello spessore di silicone nel punto della lettura stessa. Anche da questo grafico si apprezza il legame tra l'effetto del silicone sulla lettura e il suo spessore.

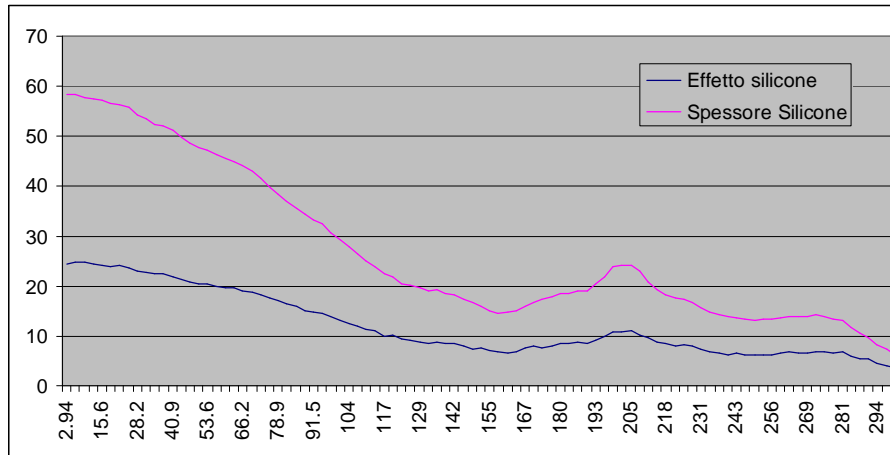


Figura 4.35 Effetto dello spessore del silicone

Riportando su un unico grafico l'effetto di deviazione introdotto dal silicone in funzione del suo spessore, ( *Figura 4.36*) si ritrova confermata sperimentalmente la proporzionalità prevista dalla discussione teorica precedentemente riportata.

Attraverso la regressione lineare dei punti del grafico è possibile dunque arrivare alla determinazione del coefficiente K di proporzionalità, che risulta pari a 0.41025.

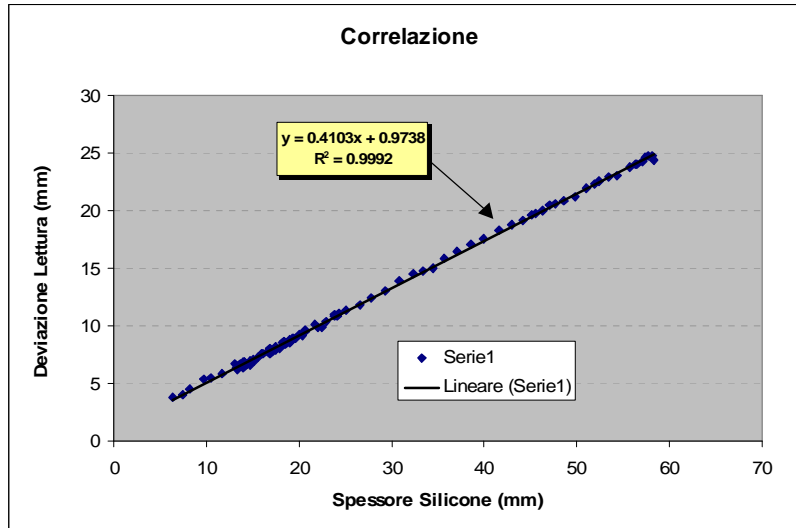


Figura 4.36 Retta di correlazione

Riscrivendo le relazione precedentemente introdotte:

$$Z_{sill,App} = Z_{sill,R} + Dev_{sil}$$

$$Dev_{sil} = K * Z_{sill,R}$$

Determinata K, attraverso la formula inversa:

$$S_{sill,R} = \frac{1}{1 + K} (Z_{app} - Z_0 - Offset)$$

È possibile trovare lo spessore reale del silicone, a partire dalla lettura apparente dello strumento  $Z_{app}$ .

## **4.5 Sviluppo e messa a punto di un sistema di sedimentazione automatizzato**

### **4.5.1 Introduzione**

L'evoluzione reale dei bacini geologici è caratterizzata, oltre che dai processi deformativi, anche da sedimentazione sindeformativa che ne influenza significativamente lo sviluppo.

Tali processi sono attualmente simulati mediante la deposizione manuale di strati di sabbia, in funzione della morfologia del modello stesso. Obiettivo di questa fase dello studio è stata la definizione di un prototipo funzionale di sedimentatore, in grado di depositare in modo automatico quantità calibrate di sabbia su aree definite del modello.

### **4.5.2 Definizione dei requisiti e dei limiti applicativi**

La funzione richiesta al dispositivo consiste nel dosaggio calibrato di sabbia, da depositare sulla superficie in evoluzione del modello, in spessori controllati ed entro aree ben delimitate.

La sabbia da deporre è la stessa con cui sono realizzati i modelli, (sabbia quarzosa) ed è utilizzata asciutta; per evidenziare i profili stratigrafici è generalmente colorata con ossidi minerali.

In base ad esperienze precedenti (KRANZ, 1991) la modalità di deposizione ed in particolare l'altezza di caduta influiscono sull'addensamento dei grani e quindi sul volume deposto ma, per questa fase di sperimentazione, tale variabile non è stata considerata.

Trattandosi di una funzione innovativa le specifiche di progetto sono definite essenzialmente in termini qualitativi; non potendo fare riferimento a dispositivi simili già realizzati le uniche informazioni utilizzabili derivano dall'analisi delle procedure manuali di sedimentazione. La costruzione e la fase iniziale di deformazione dei modelli che simulano le sedimentazioni sintettoniche sono le stesse viste nei capitoli precedenti per i modelli che non le prevedono. Nel momento in cui la deformazione ha raggiunto una fase prestabilita, in termini temporali o di percentuale di deformazione, viene definita l'area in cui è

richiesta la deposizione. La forma e lo spessore dello strato da deporre derivano dalla combinazione delle analisi svolte in fase di progettazione del modello e dalla configurazione assunta sino a quel momento (Figure 4.37, 4.38, 4.39).

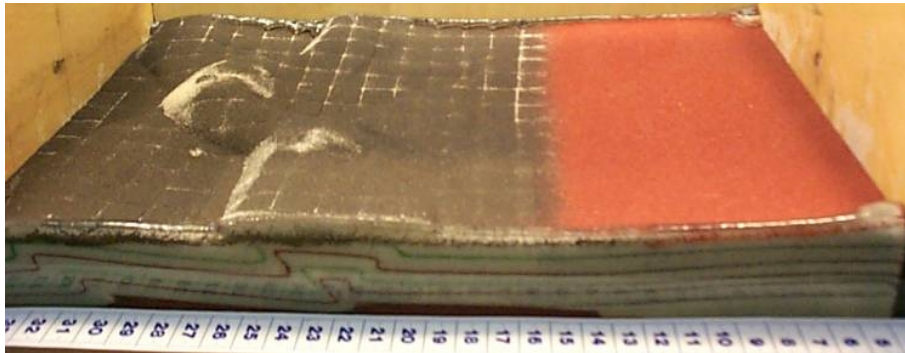


Figura 4.37 Modello parzialmente deformato

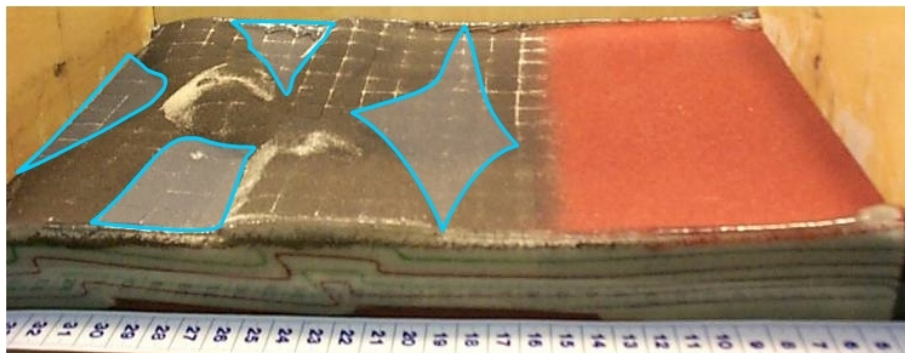


Figura 4.38 Aree di sedimentazione

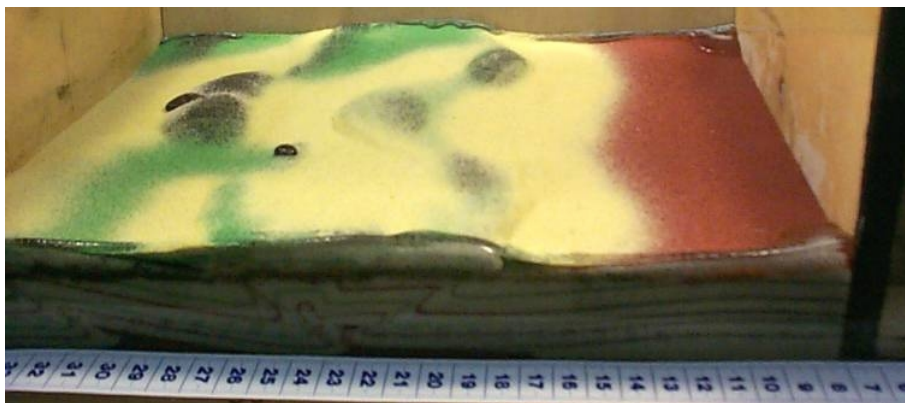


Figura 4.39 Modello sedimentato ed ulteriormente deformato

Non possono essere ipotizzate, pertanto, forme o volumi geometricamente definiti da associare ai bacini di sedimentazione e questa prerogativa ha influenzato pesantemente le scelte successive.

La sabbia deve provenire da un serbatoio alloggiato all'interno del banco, di capacità non rigidamente fissata, ma tale da consentire la deposizione di uno strato di circa 0.5 [mm] in un modello di normali dimensioni.

I limiti applicativi derivano prevalentemente dalla necessità di utilizzare per la movimentazione del complesso di dosaggio lo stesso sistema cartesiano in uso per il sensore *Laser*, pertanto dimensioni e peso dell'apparecchiatura sono stati dimensionati in modo tale da consentirne il montaggio sul braccio di supporto senza influenzare il funzionamento del sistema di scansione.

#### **4.5.2 Analisi e verifica di soluzioni progettuali**

Volendo astrarre il concetto di sedimentazione si possono individuare in questa operazione due problemi distinti ma strettamente correlati: il dosaggio della sabbia e la sua deposizione.

Il dosaggio rappresenta l'aspetto quantitativo del problema e non necessita di ulteriori approfondimenti teorici, la deposizione quello qualitativo e richiede un'analisi ulteriore.

La deposizione si può vedere come necessità di imporre una forma ed una posizione ad un dato volume/peso di sabbia. Tale problema può essere affrontato con due diverse strategie: una di tipo puntuale ed una di tipo distribuito.

La soluzione puntuale prevede la distribuzione di coni adiacenti di sabbia per ottenere una superficie sufficientemente piana.

La soluzione di tipo distribuito si ottiene sovrapponendo strisciate di sabbia di opportuna larghezza e spessore lungo tutta la superficie.

Il vantaggio previsto da una distribuzione di tipo puntuale è la possibilità di seguire con più facilità mappe di sedimentazione molto frastagliate mentre mediante una soluzione di tipo distribuita si otterrebbe, più facilmente, una superficie regolare.

Nella fase iniziale del lavoro di definizione delle soluzioni tecniche si è focalizzato lo studio sul sistema di dosaggio in quanto ritenuto l'aspetto più critico per la definizione di un prototipo.

Per quanto riguarda il dosaggio esistono diverse soluzioni tecniche al problema di misurare volumi/pesi di materiali incoerenti o polverosi. I metodi che hanno trovato applicazioni possono essere classificati in due distinte categorie: volumetrici oppure quantitativi (o a pesatura).

I dispositivi volumetrici fanno uso di sistemi che dosano quantità discrete di prodotto (esiste un volume minimo al di sotto del quale non è possibile scendere) oppure di sistemi continui, tipicamente realizzati attraverso un nastro trasportatore o una coclea (Figura 4.40).

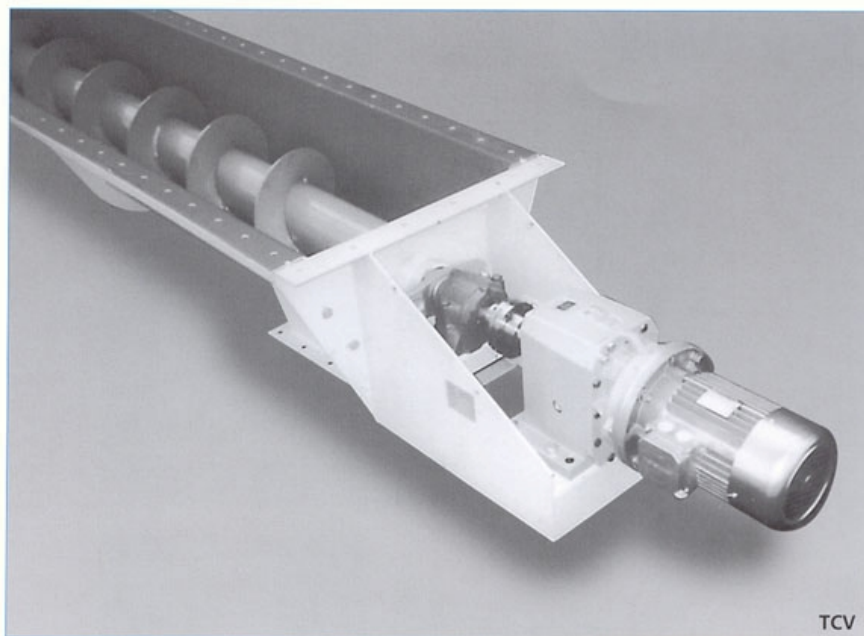


Figura 4.40 Sistema a coclea (Youngh-Massa)

I sistemi a pesatura, più costosi, consentono invece un controllo più preciso delle quantità erogate, ma sono caratterizzati dal funzionamento discontinuo e dai costi inversamente proporzionali alle quantità minime dosabili.

Un metodo di dosaggio classificabile come volumetrico continuo, che non trova però applicazioni con prodotti incoerenti, è quello delle pompe peristaltiche. Il sistema peristaltico si basa, per il pompaggio, sulla deformazione dei tubi che contengono il fluido (Figura 4.42) e trova largo uso nelle applicazioni con liquidi corrosivi o nel caso sia necessario impedire contaminazioni del prodotto.

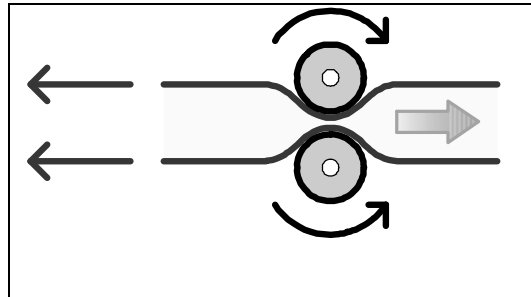


Figura 4.42 Pompa peristaltica

A causa soprattutto degli alti costi sono state accantonate soluzioni di tipo quantitativo e si è pertanto cercata una soluzione volumetrica commerciale con cui svolgere alcuni test di fattibilità.

Tra le diverse soluzioni prese in considerazione, quella che meglio si prestava alle esigenze di progetto, sia in termini di ingombro che in termini di precisione dell'erogazione, è stata individuata nel sistema di dosaggio dello zucchero presente nei distributori automatici di bevande (Figura 4.42).

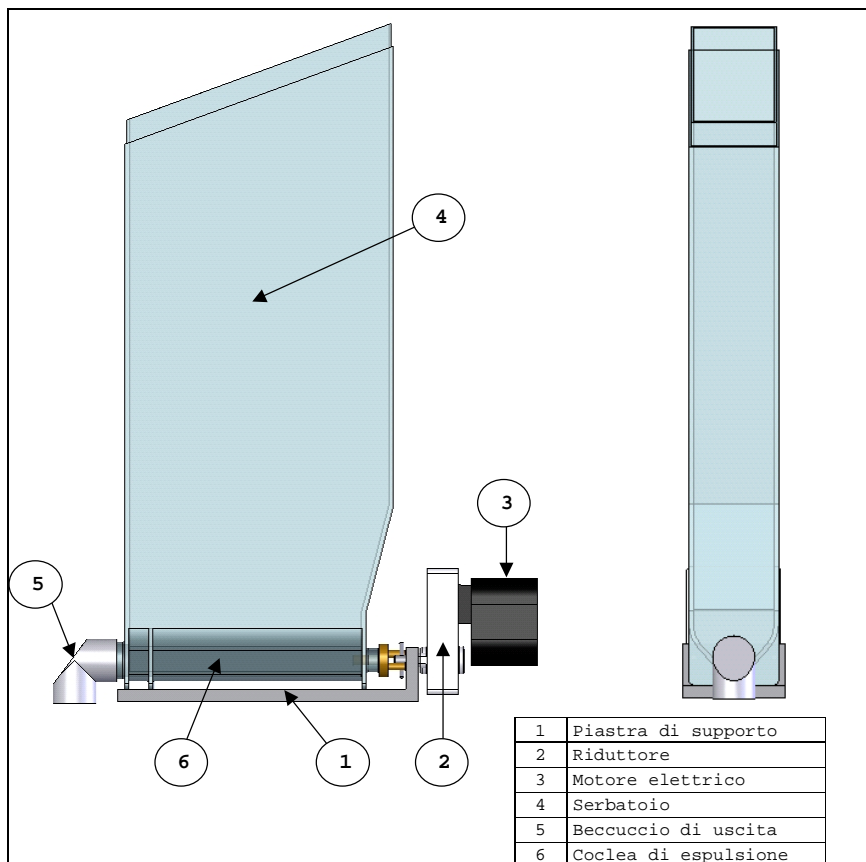


Figura 4.42 Dosatore

Acquisito il componente, è stato testato con le sabbie in uso per la realizzazione dei modelli analogici.

Il sistema integra in un solo corpo serbatoio e canale ed è mosso da un motoriduttore in corrente continua. Il problema dell'ingombro in questa prima fase non è stato considerato in quanto l'attenzione era concentrata sulle prestazioni ottenibili dal sistema volumetrico.

Sin dalle prime prove sono emersi problemi di difficile risoluzione quali la difficoltà di regolazione alle basse velocità di rotazione della coclea e la sensibile variazione di coppia richiesta al variare della colonna di sabbia sovrastante nel serbatoio.

Ulteriori difficoltà sono state poste dal surriscaldamento del motore, alle basse velocità di rotazione, necessarie per un dosaggio sufficientemente preciso e dalla sabbia residua presente nel canale che tende a scivolare al minimo scuotimento.

Le prove svolte non hanno quindi avuto esito positivo in termini funzionali, ma sono comunque servite per acquisire ulteriori conoscenze sui sistemi volumetrici a funzionamento continuo basati su coclea.

Successivamente è stata sperimentata anche una soluzione basata sul sistema peristaltico, non essendo disponibili soluzioni commerciali sono stati approntati alcuni sistemi prototipali con tubi in gomma siliconica del diametro di 6 e 8 mm (Figure 4.43, 4.44).

Le verifiche da svolgere riguardavano le modalità di passaggio della sabbia nei tubi e la fattibilità di un meccanismo di deformazione simile a quello utilizzato nei sistemi commerciali.

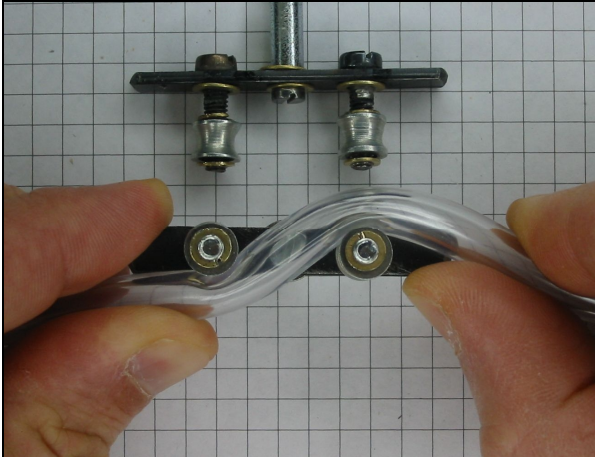


Figura 4.43 Sistema peristaltico (laterale)

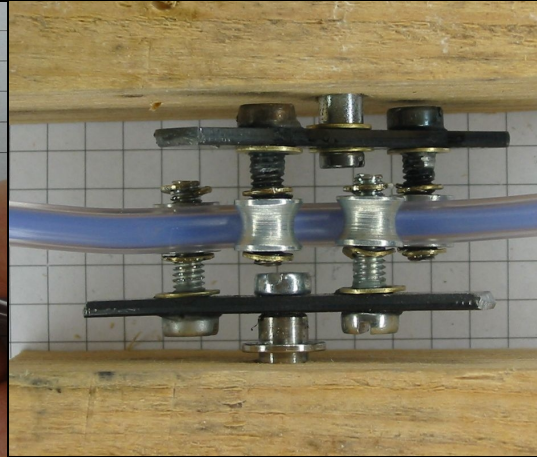


Figura 4.44 Sistema peristaltico (pianta)

Il flusso della sabbia all'interno dei tubi è risultato sorprendentemente fluido, ma non si è trovata nessuna soluzione implementabile in tempi brevi per l'azionamento del sistema di deformazione.

Questi test hanno permesso di appurare che è possibile convogliare sabbia per caduta, in quantità considerevoli, utilizzando tubi di adeguata sezione e che quindi il serbatoio della sabbia può essere separato dal sistema di dosaggio.

In base alle esperienze accumulate con sistema di dosaggio commerciale e con il sistema peristaltico si è ritenuta comunque valida ed applicabile la soluzione della coclea, a condizione di realizzare uno strumento "*custom*" di dimensioni adatte all'applicazione nel banco e progettato tenendo in considerazione tutte le conoscenze acquisite con i precedenti test.

Alla soluzione ottimale in termini di dimensioni si è arrivati selezionando una serie di prototipi realizzati con blocchetti di *teflon* forati al cui interno ruotano manualmente viti da legno (Figura 4.45). Sono state sperimentate anche delle molle (Figura 4.46) quali viti senza fine ma il miglior funzionamento è stato ottenuto con un canale con foro da 10 [mm], viti da legno commerciale con diametro di 9,5 [mm] e passo 4,6 [mm]. Si è adottata tale configurazione per la coclea quindi si è passati allo studio del sistema di movimentazione e comando.

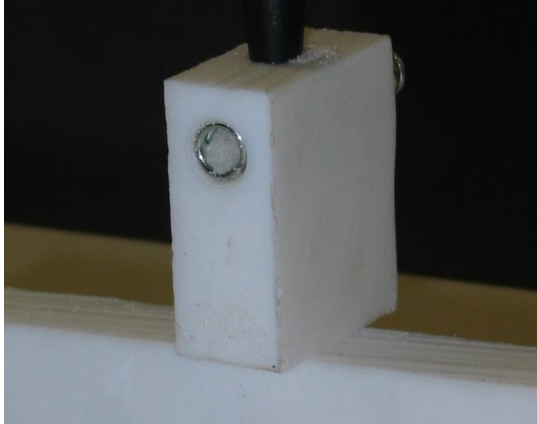
Figura 4.45 Blocchetto di *teflon*

Figura 4.46 Test con viti senza fine

In base alle esperienze teoriche ed applicative, si è deciso di utilizzare, per la rotazione della vite, un motore passo-passo. Tali motori permettono di quantificare in modo estremamente preciso la quantità di materiale depositato in quanto ruotano per passi discreti, presentano inoltre il vantaggio che l'elettronica di potenza necessaria per l'azionamento è facilmente realizzabile e altrettanto facilmente pilotabile con segnali di livello TTL (TTL acronimo di *Transistor Transistor Logic*, tecnica per l'invio di segnali, in questo caso di movimento)

Il motore adottato è accoppiato al canale tramite un telaio in materiale plastico (Figura 4.47) e trasmette il moto alla vite tramite un manicotto in materiale plastico (Figura 4.48). La soluzione realizzata si può classificare come sistema di dosaggio volumetrico discreto in quanto il volume minimo di sabbia erogabile è pari a circa  $0,5 \text{ mm}^3$ .

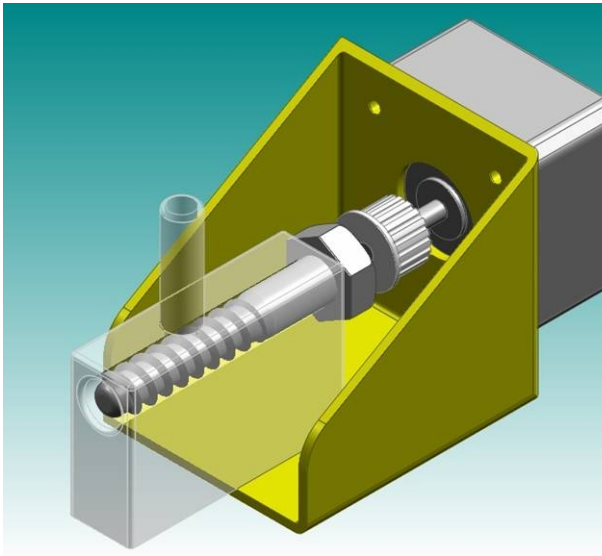


Figura 4.47 Disegno 3D del sedimentatore

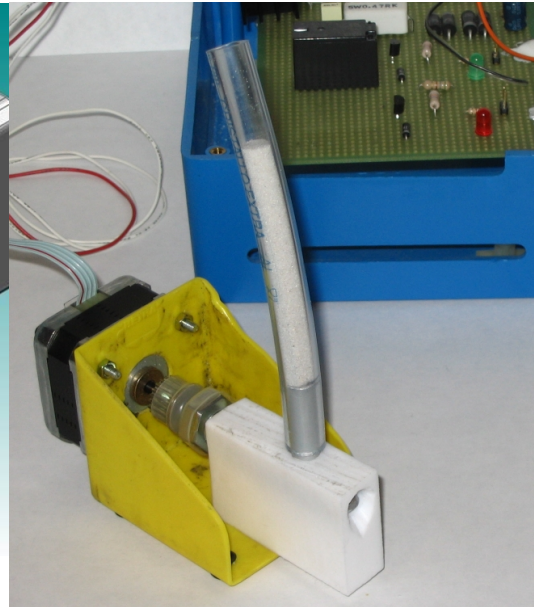


Figura 4.48 Sedimentatore

I test condotti con questo prototipo hanno evidenziato la validità della soluzione a coclea dimostrando una buona precisione di dosaggio ed una portata adeguata. Caratteristiche importanti della soluzione realizzata sono risultate il ridotto ingombro e la possibilità di separare il dosatore dal serbatoio con conseguente riduzione di massa.

Per quanto riguarda l'aspetto della deposizione sono state individuate due soluzioni facilmente implementabili sul dosatore per avere deposizioni puntuali oppure distribuite.

In base a prove effettuate con i prototipi si è visto che è indifferente dal punto di vista del dosaggio, far uscire la sabbia dalla bocca frontale o da un foro praticato nella parte inferiore del canale.

Per sperimentare deposizioni puntuali si è quindi previsto un ugello verticale da applicare nella parte inferiore del canale mentre per quelle distribuite un beccuccio frontale in grado di spargere la sabbia su un fronte più ampio.

#### 4.5.4 Soluzione adottata

Verificata la validità della "mini coclea" per la realizzazione del sistema di dosaggio si è passati alla realizzazione dell'apparato definitivo con cui realizzare le prove di caratterizzazione.

Rispetto al prototipo utilizzato per i test di fattibilità il sistema definitivo ha visto invariato il complessivo vite/motore, in quanto si era dimostrato perfettamente adeguato allo scopo.

I componenti oggetto di evoluzione o riprogettazione sono stati il telaio, il canale, il serbatoio, la scheda di potenza, e il *software* di controllo.

La movimentazione dell'apparato di sedimentazione è realizzata per mezzo dello stesso sistema cartesiano che sostiene il *Laser* di scansione, in quanto, la realizzazione di un sistema di movimentazione autonomo si sarebbe scontrata con limiti di ingombri, tempi e costi insormontabili. Una delle limitazioni più stringenti riguardo la definizione del sistema sedimentatore è pertanto rappresentata dagli ingombri.

Il sistema di scansione *Laser* richiede una distanza di posizionamento dalla superficie compresa tra 110 e 330 [mm], pertanto il primo vincolo di ingombro è rappresentato da un piano orizzontale posto a 110 [mm] dal bordo inferiore dello strumento *Laser*. Analogamente, la larghezza di scansione oltrepassa i bordi laterali di 45 [mm] ed è stato quindi necessario scartare qualsiasi tipo di posizionamento laterale al *Laser*, per non correre il rischi di urtare le pareti di contenimento del modello.

Si è inoltre considerato ottimale un punto di caduta della sabbia coincidente con il segmento di scansione, pertanto si è adottata la configurazione rappresentata in Figura 4.49. Il telaio di supporto è diviso in due componenti: il telaio del sedimentatore, simile a quello del primo prototipo ed il telaio di aggancio che ha anche funzione di sostegno per lo strumento *Laser*. Approfittando della riprogettazione del fissaggio, il punto di lettura del *Laser* è stato reso coassiale con la guida di traslazione lungo l'asse Z. Per il collegamento dei due telai si è studiata una soluzione che mettesse al riparo da eventuali urti durante il funzionamento dell'apparato. Il movimento reciproco durante l'uso normale è impedito da un collegamento detto "di forza" (Figura 4.50), la vite di serraggio ha un diametro inferiore al foro di alloggiamento e svolge unicamente la funzione di mantenere serrate le superfici di contatto.

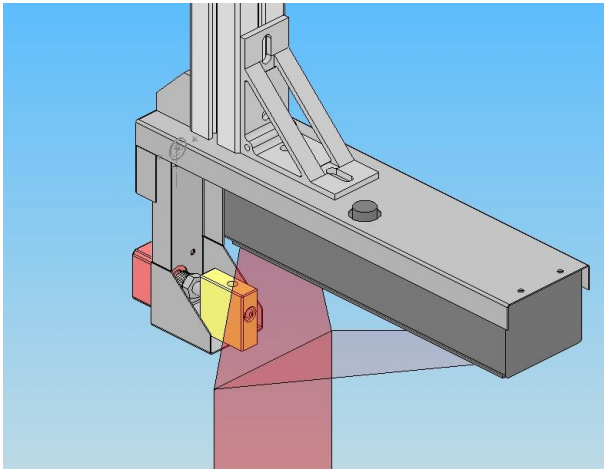


Figura 4.49 Telaio di supporto

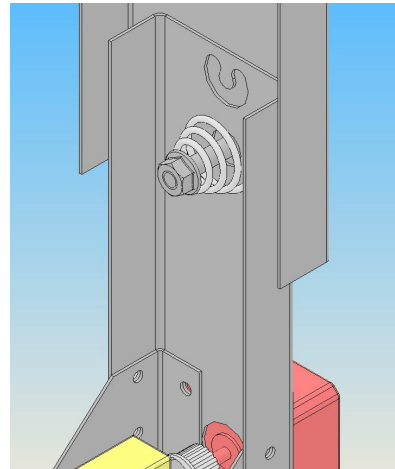


Figura 4.50 Dettaglio del telaio

La forza di compressione è trasmessa dalla molla il cui precarico può essere regolato con il dado di chiusura.

E' possibile in questo modo regolare il precarico in modo da non avere scorrimenti nelle fasi di movimentazione consentendo dislocamenti in casi di urto. Per segnalare la condizione di collisione è stato previsto il montaggio di un sensore che apre il contatto dopo uno spostamento relativo di 1 mm.

Tutti i test sono stati svolti senza interposizione della molla in quanto non è ancora stata reperita in commercio con la forma e le caratteristiche necessarie, l'unica soluzione sembra essere la realizzazione su misura che comporta però costi molto elevati e, allo stato attuale, non giustificati. E' stato tralasciato per tale motivo anche il montaggio del sensore di urto, anche se in questo caso sono già state individuate valide soluzioni commerciali di basso prezzo.

I telai sono stato realizzati, grazie la collaborazione dell'officina di Fisica, in lamierino di *ergal* (lega di alluminio) piegato e saldato spesso 1 [mm].

Per consentire i due tipi di distribuzione, puntuale e distribuita, sono stati realizzati due canali intercambiabili sui quali sono stati montati un ugello verticale ed un beccuccio inclinato (Figure 4.51, 4.52 ).

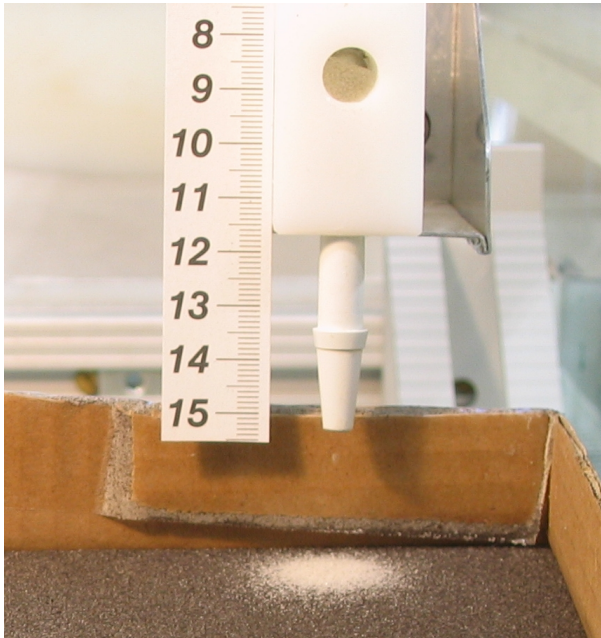


Figura 4.51 Ugello

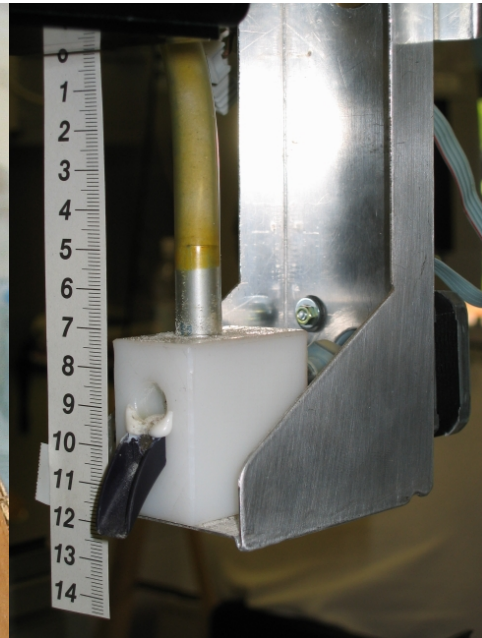


Figura 4.52 Beccuccio

Il serbatoio della sabbia è costituito da un contenitore in PET da 0.5 litri, fissato alla guida di traslazione lungo Z, la sabbia arriva al dispositivo di dosaggio tramite un tubo in gomma silconica da 8 [mm] di diametro.

Un requisito fondamentale per il sedimentatore è la possibilità di integrazione con il sistema di controllo ed acquisizione già operativo; all'atto dell'acquisto dell'ambiente integrato *Labview*<sup>®</sup> erano state incluse funzionalità di I/O digitale ed analogico che sono state utilizzate per il pilotaggio del dispositivo.

In particolare si è utilizzata un'uscita digitale della scheda per la generazione dell'onda quadra di pilotaggio. La scheda di potenza è stata sostituita con un'altra realizzata appositamente, i componenti utilizzati non differiscono dalla precedente, ma, grazie all'utilizzo di un circuito prestampato per i collegamenti, l'affidabilità prevista è molto superiore (Figura 4.53). Lo schema adottato permette inoltre di regolare la corrente assorbita dal motore ed impedire quindi pericolosi surriscaldamenti. La scheda è realizzata in modo da muovere di un passo ( $1,8^\circ$ , 200 passi = 1 giro) il motore in corrispondenza della presenza all'ingresso di un fronte di salita, variando la frequenza dell'onda quadra è possibile variare la velocità di rotazione del motore.

Se il segnale resta ad un livello logico alto o basso il motore non ruota e rimane "in coppia", nel senso che è percorso dalla corrente e frenato con la stessa

coppia nominale erogata in movimento. Di tale caratteristica si è tenuto conto nella taratura della corrente di picco in quanto il motore è sempre alimentato e non sono presenti i transistori a carico nullo che consentono un parziale raffreddamento. Con una corrente di 0.5 [A] si è osservato che la coppia erogata è ampiamente sufficiente alla movimentazione della vite, senza che la temperatura del motore salga eccessivamente. Il *software* di controllo è stato interamente riscritto passando dal linguaggio C all'ambiente visuale *Labview®*. L'avvio e la regolazione della velocità di rotazione del motore si realizzano variando la frequenza di generazione dell'onda quadra generata dalla scheda DAQ 6036, tale funzione si ottiene tramite apposite *routines* che si interfacciano tra lo strato *hardware* ed il *software*. In Figura 4.54 è riportata l'interfaccia del pannello di controllo mediante il quale si impostano la frequenza di generazione dell'onda quadra ed il numero di giri da compiere.

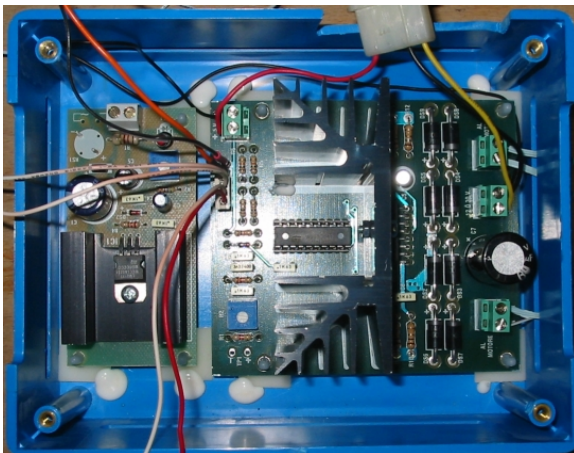


Figura 4.53 Circuito di controllo

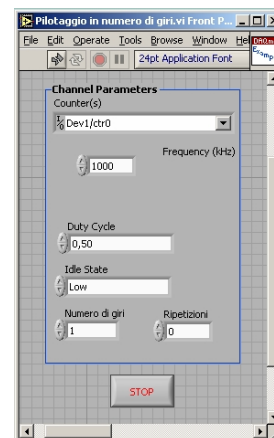


Figura 4.54 Gestione software

#### 4.5.5 Caratterizzazione del sistema

Per definire una corretta metodologia di sedimentazione è indispensabile disporre di uno strumento che eroghi una quantità adeguata di sabbia in modo preciso e continuativo, devono inoltre essere note la forma e la dimensione degli strati di sabbia depositi.

I test svolti hanno avuto quindi come obiettivo la completa caratterizzazione dello strumento sedimentatore in termini di definizione della portata in sabbia e geometria degli strati depositi. Per quanto riguarda la portata, è stata

quantificata in modo preciso in funzione delle variabili di sistema quali numero di giri e velocità di rotazione della vite, i risultati delle prove hanno permesso inoltre di verificare la precisione dello strumento in termini di accuratezza e ripetibilità.

Dal punto di vista geometrico sono stati caratterizzati: forma del getto, spessore e larghezza dello strato depositato di entrambi i modelli di sedimentatore. I parametri considerati per tali verifiche sono stati l'altezza di caduta e la velocità di rotazione della vite.

### Test di portata in massa

Lo scopo del primo test è stato definire la precisione e quantificare la portata in massa del sedimentatore al variare della velocità e del numero di giri. Per il primo test si è utilizzato il canale con beccuccio depositando la sabbia in un contenitore di alluminio, il quantitativo di sabbia depositato è stato pesato tramite una bilancia analitica con precisione di 0.05 grammi. I test sono stati effettuati alle frequenze di 1000, 1500, 2000 [Hz] corrispondenti a velocità di rotazione di 150, 225 e 300 [rpm]. Per ogni velocità di rotazione sono state eseguite 5 pesate dopo 100, 200 e 400 giri di deposizione. I dati ottenuti sono riportati nel grafico 4.1 e nella tabella 4.4.

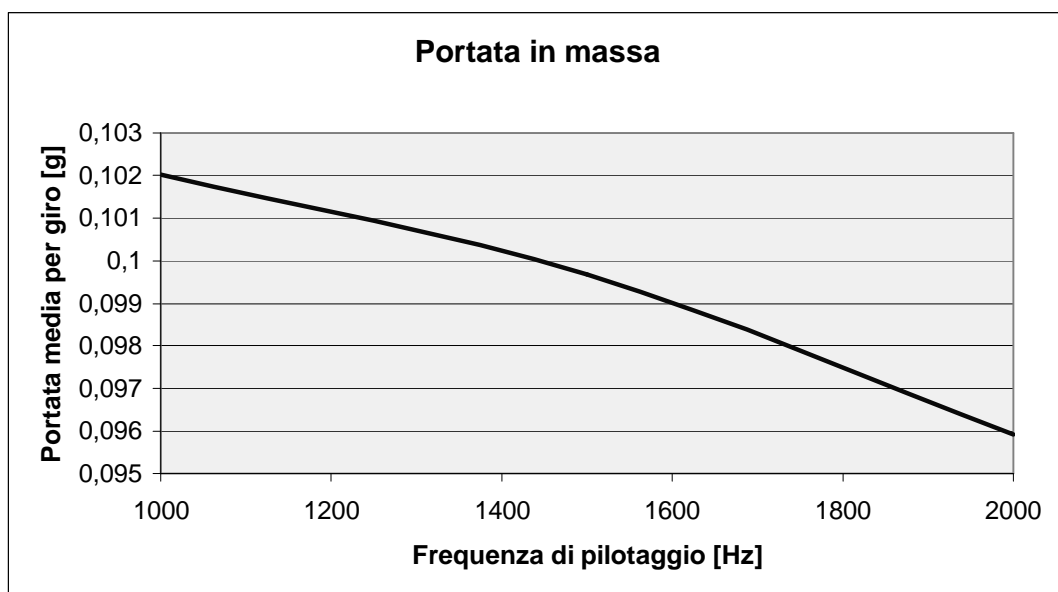


Grafico 4.1 Portata del sedimentatore

Frequenza [Hz]	Portata media per giro [g]	Deviazione %
1000	0,102	0,41
1500	0,099	0,81
2000	0,095	0,58

Tabella 4.4 Frequenza vs. portata

Si osservi innanzitutto la buona ripetibilità dello strumento che presenta deviazioni percentuali della massa di sabbia erogata tra lo 0,4 % e lo 0,8 %. La portata non rimane invece perfettamente costante al variare della velocità, si osserva infatti nel grafico come questa cali leggermente al crescere della frequenza, un tale comportamento è prevedibile considerando il comportamento simile ad un fluido da parte della sabbia e di conseguenza gli attriti proporzionali alle velocità di scorrimento.

#### Test di portata volumetrica

Lo scopo del secondo test è stato la quantificazione della portata in massa e volume dosati.

Per questo test si è utilizzato il canale dotato di beccuccio, per la misurazione del volume sono stati utilizzati due *becker* da laboratorio da 100 e 250 [ml] (Figura 4.55) e le dosate sono state pesate con la stessa bilancia analitica utilizzata per il primo test.

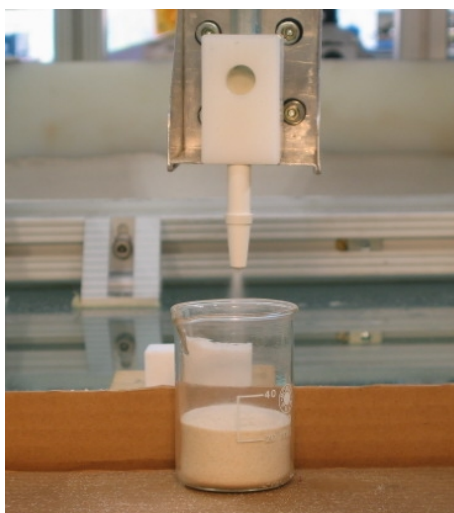


Figura 4.55 Test di portata volumetrica

I dati ottenuti sono riportati nella tabella 4.5.

Frequenza [Hz]	N° giri	Volume erogato [ml]	Massa erogata [g]	Portata per giro [g]	Portata per giro [ml]	Densità sperimentale
1800	900	65	117.7	0.131	0.072	1.81
1800	1500	115	200	0.133	0.077	1.74
1000	2000	150	269	0.134	0.075	1.79

Tabella 4.5 Valori registrati

La precisione della misura del volume è sicuramente ridotta utilizzando normali contenitori da laboratorio ma la densità ricavata sperimentalmente concorda con i valori noti e consente di giudicare attendibili i valori di portata volumetrica per giro.

Interessante anche il confronto della portata massima tra beccuccio e ugello verticale. La portata per giro del primo, a parità di frequenza, risulta di circa 0.1 [g] contro i 0.13 [g] del secondo. La spiegazione a tale comportamento si può ipotizzare nella maggiore lunghezza del tratto di canale compreso tra ingresso e uscita nel sedimentatore con beccuccio e nelle tolleranze di diametro tra i due canali.

### Test di forma

Lo scopo dei test di forma è stato quello di caratterizzare dal punto di vista geometrico lo strato di sabbia depositabile dai due diversi sedimentatori. I parametri che possono influenzare tale caratteristica sono la portata massima, l'altezza di caduta e la velocità di spostamento.

Il primo test si è svolto con il sedimentatore immobile ed ha avuto lo scopo di valutare l'accrescimento di un cono isolato di sabbia, erogata dal canale con ugello verticale. Non sono stati fatte misure dirette, ma l'apparato sperimentale approntato, consente di svolgere tutti i rilievi sulle foto digitali acquisite.

Per valutare l'influenza dell'altezza di caduta sono state eseguite due prove distinte con altezze pari a 32 (Figure 4.55 a,b,c) e 100 [mm] (Figure da 4.57 a,b,c).

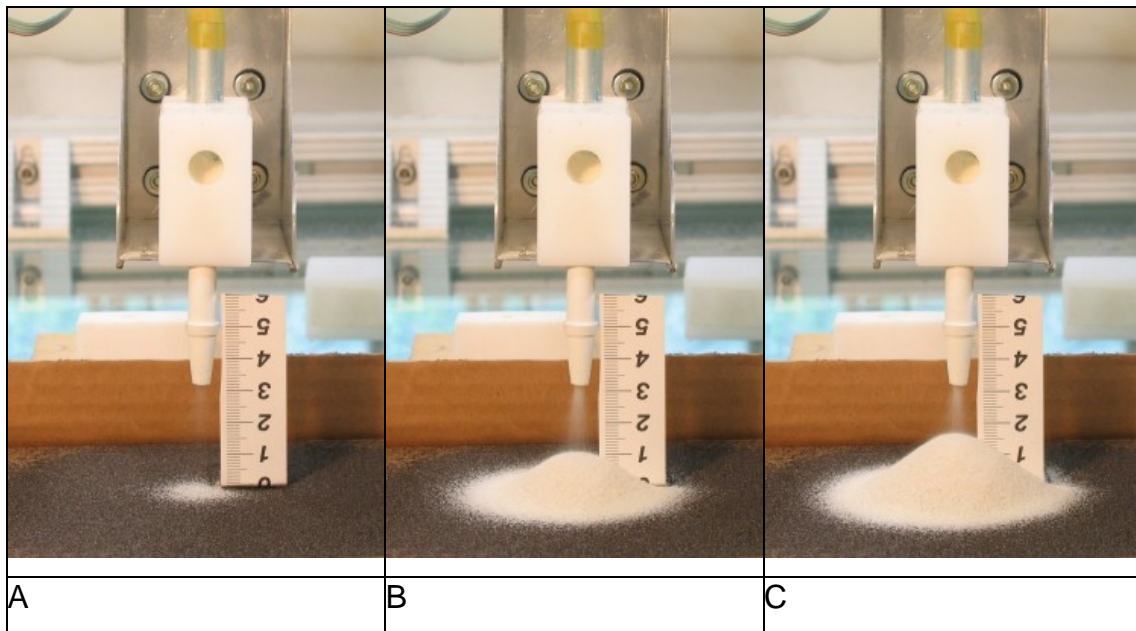


Figura 4.56 Test di altezza di caduta

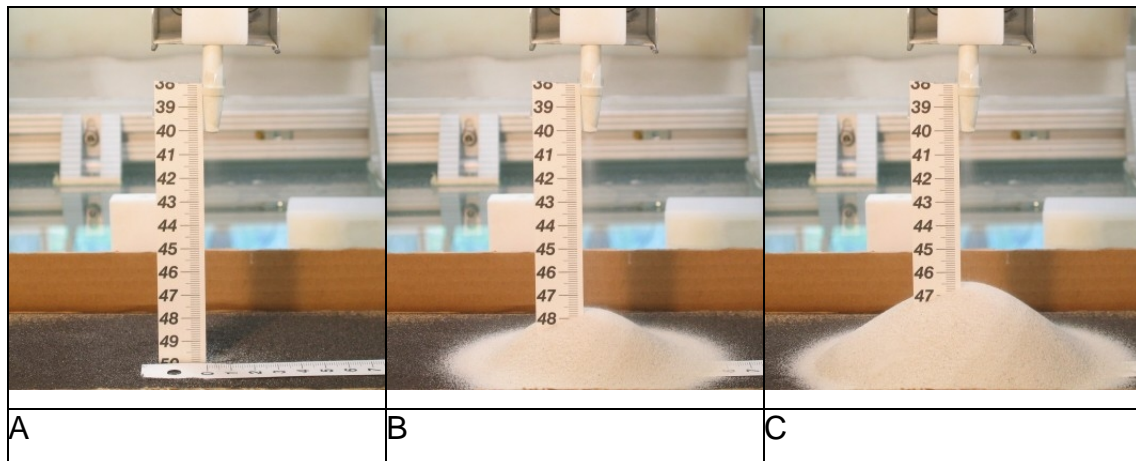


Figura 4.57 Test di altezza di caduta

La seconda batteria di test si è svolta sempre con il sedimentatore a beccuccio ma in questo caso in movimento. Lo scopo è stato quello di determinare la forma dello strato depositato e di valutare la superficie risultante da più passate adiacenti (Figura 4.58). Per eseguire la movimentazione si è adattato il programma utilizzato per le scansioni, i parametri regolabili sono la velocità di traslazione lungo l'asse X, la distanza tra le strisciate lungo Y e l'altezza di caduta.

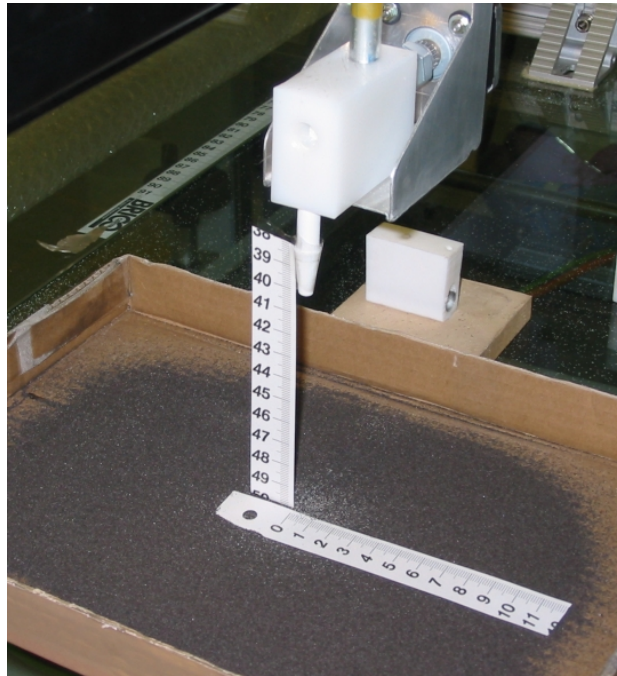


Figura 4.58 Test di forma

Nel corso di questa serie di prove sono state mantenute fisse la velocità di traslazione e la portata erogata, sono stati in questo modo valutati gli effetti imposti alla sedimentazione dal variare della distanza tra le strisciate e dall'altezza di caduta (misurata dal bordo dell'ugello).

Anche in questo caso non sono stati fatte misure dirette ma rilievi sulle foto digitali acquisite.

Dopo una serie di tentativi si è trovata una combinazione tale per cui la superficie depositata assumeva un aspetto sufficientemente regolare.

Nelle Figure da 4.59 a 4.61 si può osservare la superficie risultante dalla combinazione dei valori riportati in tabella 4.6.

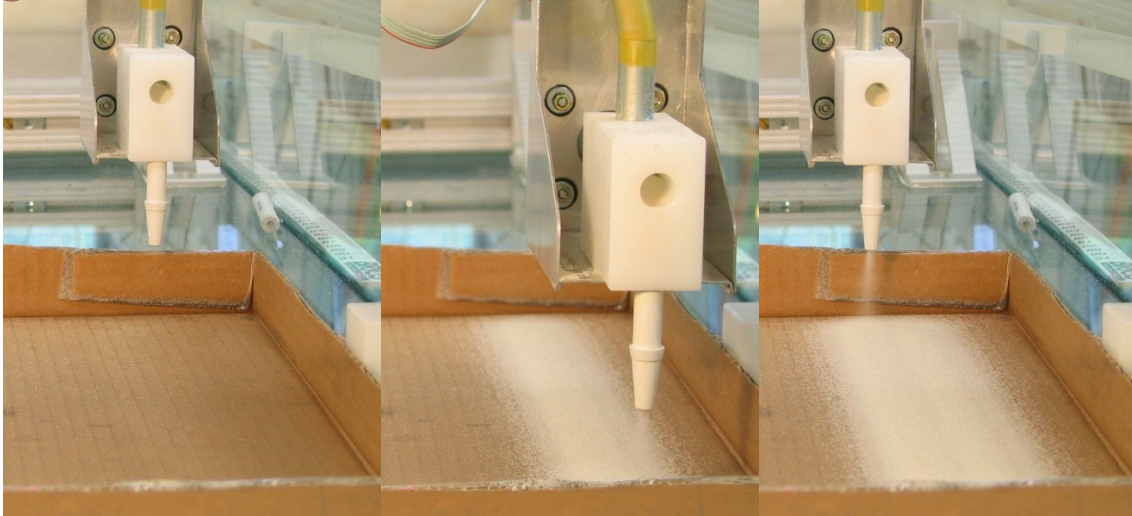


Figura 4.59 Test foto 1

Figura 4.60 Test foto 2

Figura 4.61 Test foto 3

Frequenza [Hz]	1000
Velocità lungo X [mm/s]	10
Distanza tra le passate [mm]	16
Altezza di caduta [mm]	30

Tabella 4.6

Per valutare l'effetto dato dalla variazione d'altezza di caduta sono stati eseguiti dei test depositando su un piano inclinato, tale soluzione ha permesso di verificare in modo rapido l'effetto sulla sovrapposizione, delle variazioni di profilo della superficie su cui si deposita.

Nelle Figure da 4.62 a 4.64 si può osservare la superficie risultante dalla combinazione dei valori riportati in tabella 4.7.

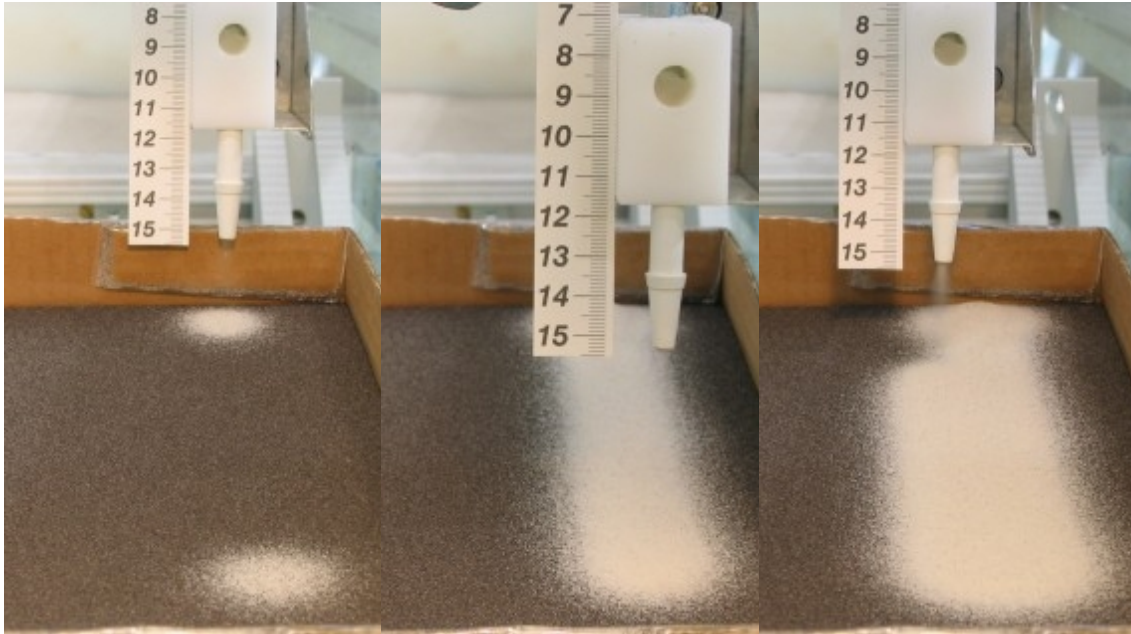


Figura 4.62 Test foto 1

Figura 4.63 Test foto 2

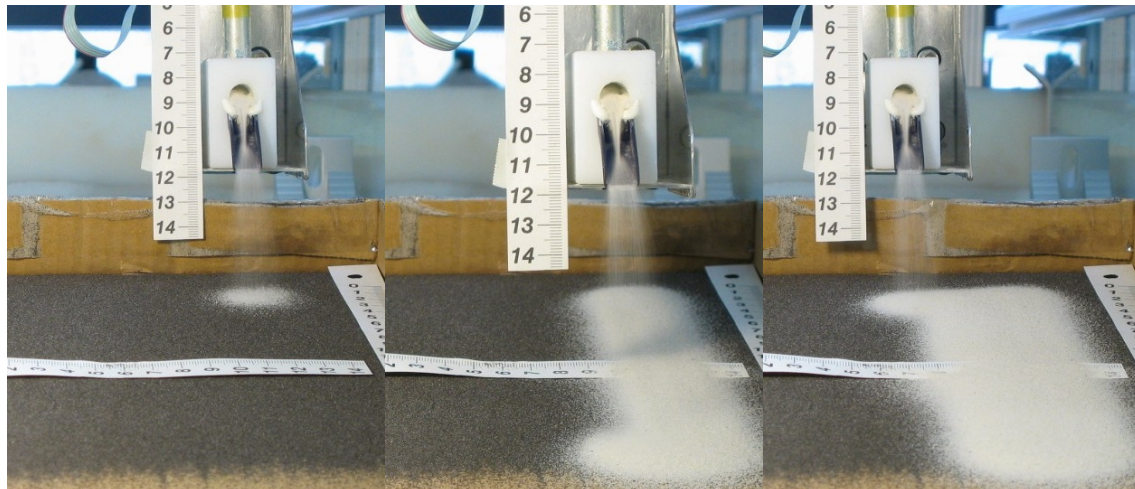
Figura 4.64 Test foto 3

Frequenza [Hz]	1800
Velocità lungo X [mm/s]	10
Distanza tra le passate [mm]	16
Altezza di caduta minima [mm]	26
Altezza di caduta massima [mm]	56

Tabella 4.7

La terza batteria di test ha interessato il sedimentatore a beccuccio. Come per l'ugello sono state eseguite prove con piano orizzontale e piano inclinato e, grazie ai dati raccolti, si è potuto approntare un test più sofisticato. Su un piano inclinato predisposto per i rilievi fotografici sono stati sovrapposti tre strati di deposizione e di ognuno di questi è stata effettuata la scansione della superficie con il sistema *Laser*.

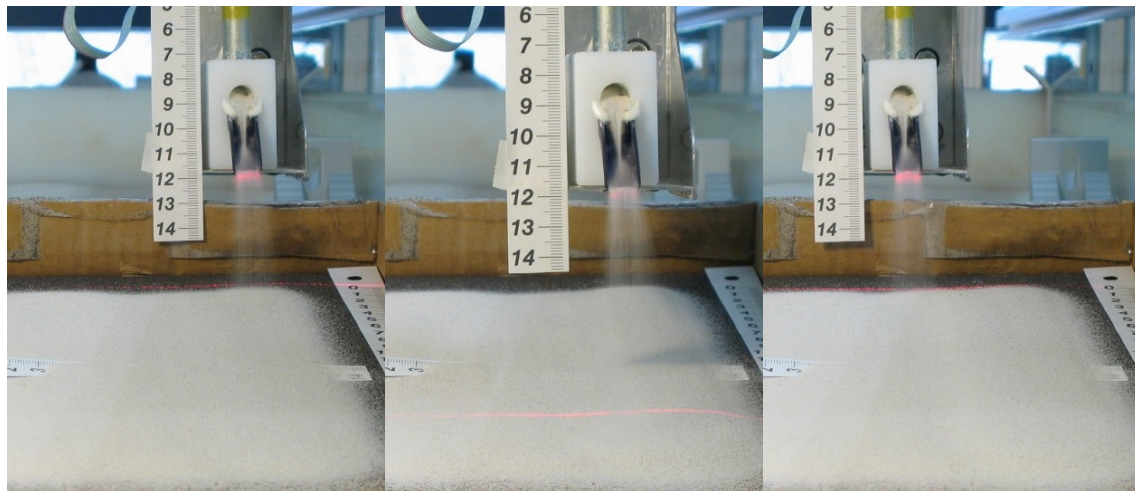
Nelle Figure (4.65 a-i) si può osservare l'evoluzione dell'esperimento i cui parametri sono riportati in tabella 4.8.



A Primo strato

B Primo strato

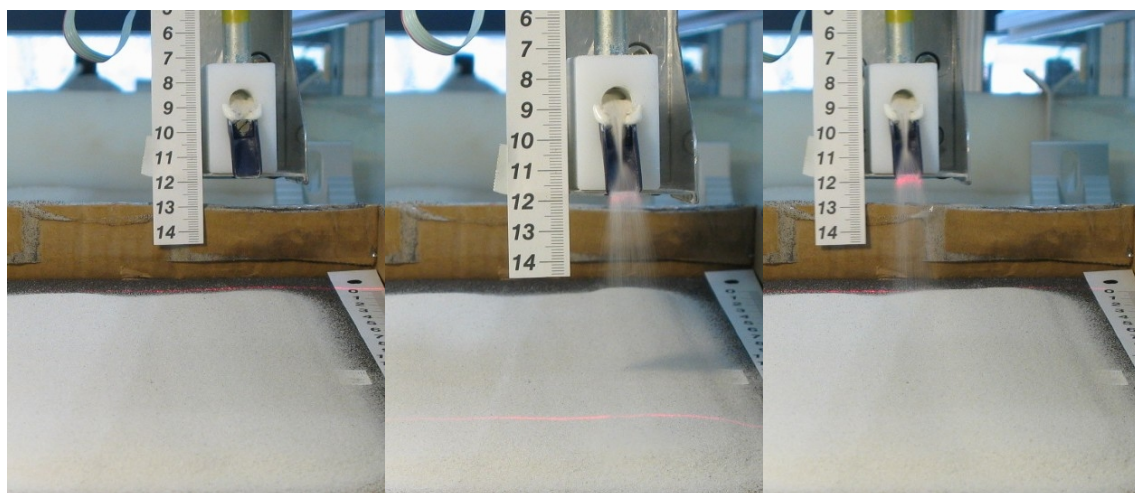
C Primo strato



D Secondo strato

E Secondo strato

F Secondo strato



G Terzo strato

H Terzo strato

I Terzo strato

Figura 4.65 Test di sedimentazione completo

Nella Figura 4.66 è riportata l'elaborazione grafica della scansione.

Frequenza [Hz]	1800
Velocità lungo X [mm/s]	13
Distanza tra le passate [mm]	19
Altezza di caduta minima [mm]	50
Altezza di caduta massima [mm]	84

Tabella 4.8

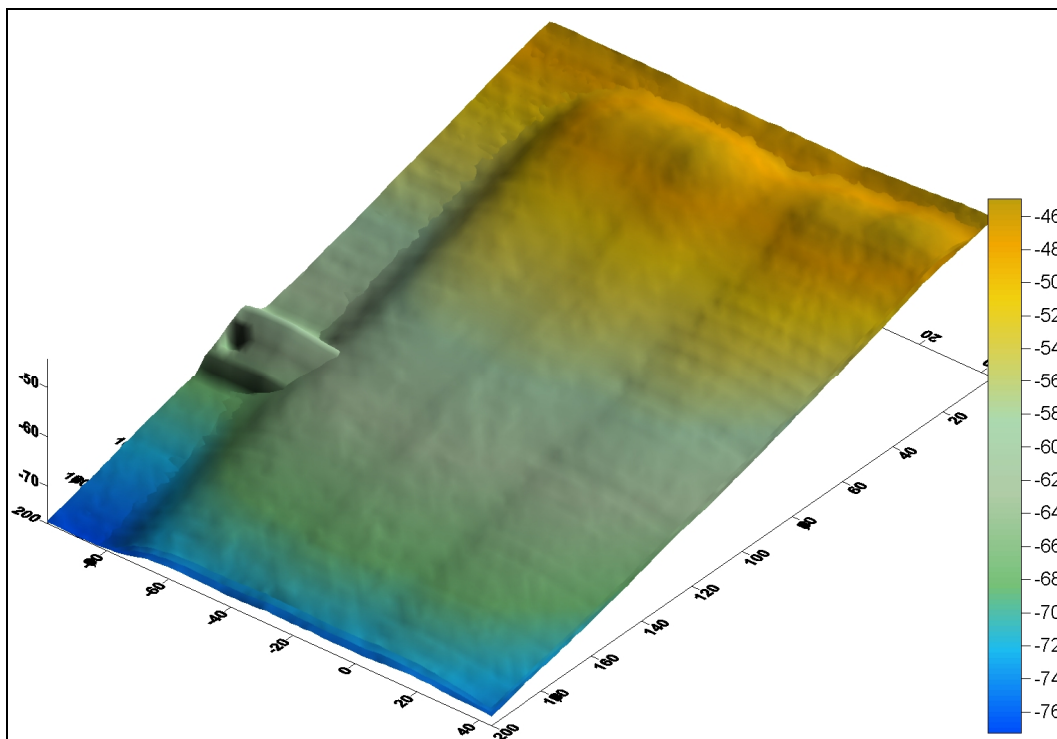


Figura 4.66 Topografia 3D della sedimentazione

Il quarto test è servito per caratterizzare la forma del getto di sabbia in caduta dal beccuccio, in particolare per correlare lo spostamento del punto di caduta e l'altezza di deposizione. In previsione della futura definizione di un sistema di deposizione totalmente automatizzato tale dato è necessario per la creazione di una mappa di guida per la sedimentazione, che si basi sulle scansioni *Laser*. Anche in questo caso l'apparato è stato predisposto per rilievi fotografici ed il sedimentatore è rimasto fisso. L'unico parametro di funzionamento che è stato

variato è la frequenza di pilotaggio per la quale è stata analizzata tutta la gamma utile: da 1000 a 2200 [Hz] con “step” di 100 [Hz]. Nelle Figure da 4.67 a 4.69 si può osservare che il profilo della traiettoria non varia al variare della velocità, cambia solo la densità del getto.

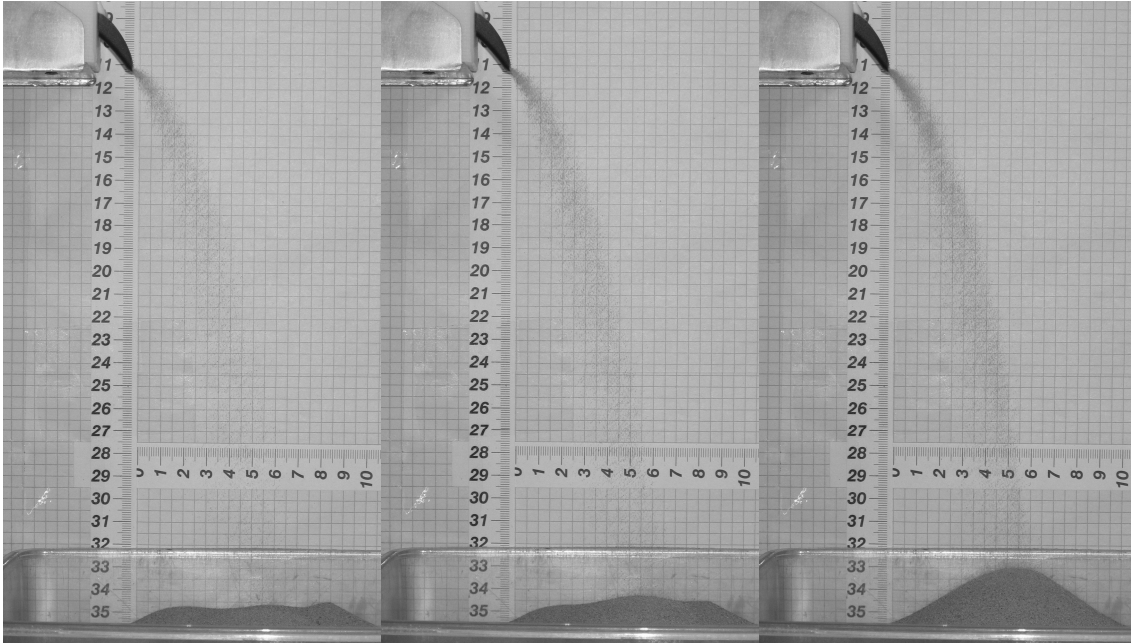


Figura 4.67 1000 [Hz]

Figura 4.68 1500 [Hz]

Figura 4.69 2000 [Hz]

Con un metodo in parte grafico ed in parte analitico è stata ricavata l'equazione del getto:

Dato il sistema di coordinate della Figura 4.70 si può scrivere l'equazione del profilo medio del getto come:

$$X = 0,35 + 0,46Zr - 0,01(Zr)^2 \quad (4.1)$$

Nella quale  $Zr=Z-11,5$  (quota in [mm] riferita al beccuccio)

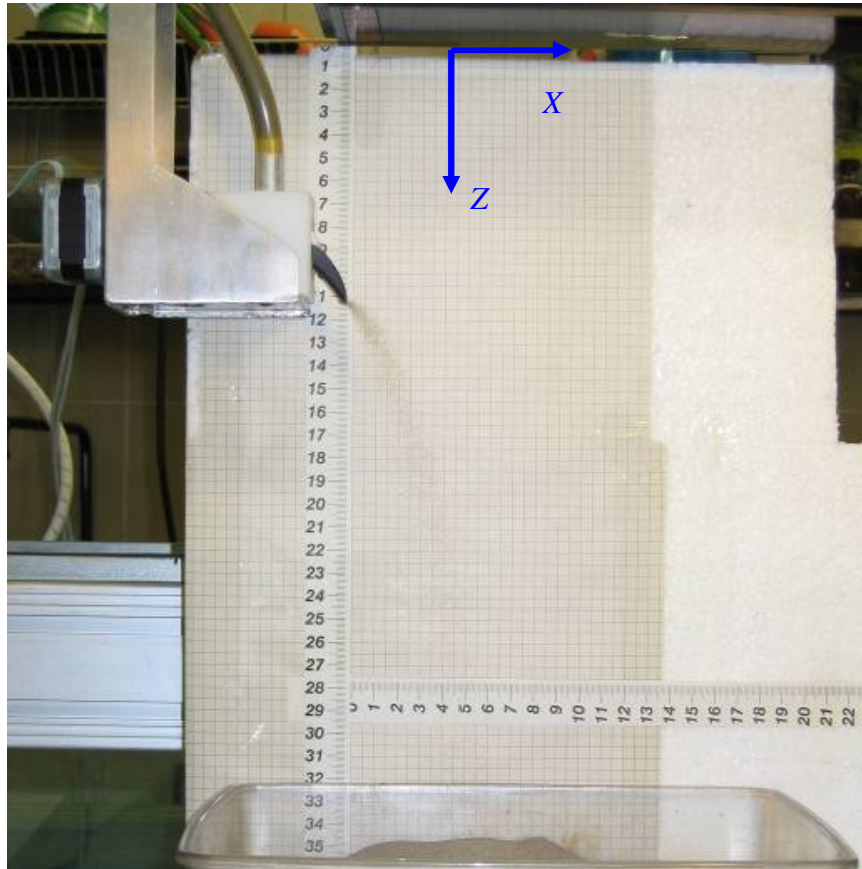


Figura 4.70 Sistema di coordinate del getto

Nel grafico 4.2 si osserva la sovrapposizione della curva ricavata graficamente con quella analitica, si noti che con  $Z_r$  compreso tra 50 e 200 [mm] esse sono sostanzialmente coincidenti.

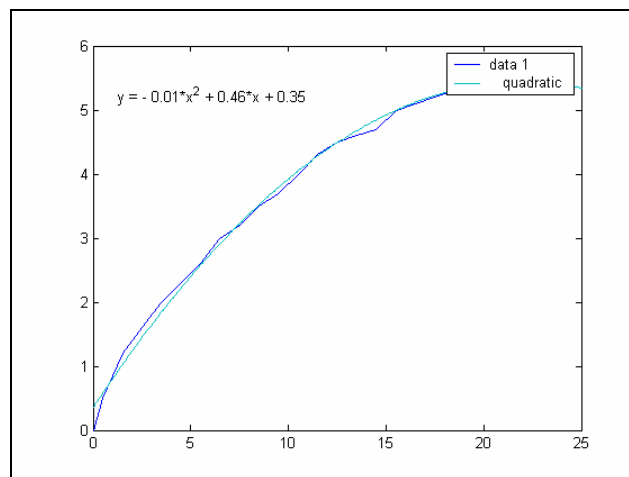


Grafico 4.2 (vedi testo)

#### **4.5.6 Analisi dei dati e conclusioni**

Le prove di portata hanno dimostrato che il sistema è adeguato per dosare in modo preciso e continuativo quantità predeterminate di sabbia. Per quanto riguarda la deposizione sia il modello ad ugello verticale che il modello a beccuccio hanno consentito di ottenere con estrema facilità una superficie depositata sufficientemente regolare. La costanza della forma del getto di sabbia, in un ampio intervallo di altezze di deposizione, fanno ritenere la soluzione a beccuccio quella più valida per i futuri sviluppi. Grazie alla completa integrazione con gli apparati del banco, il sedimentatore proposto si presta ad una futura sperimentazione di algoritmi più evoluti per la totale automazione dei processi sedimentativi sintettonici.

### **4.6 Progettazione di un sistema per la misura e l'acquisizione degli sforzi presenti sulla parete di deformazione**

#### **4.6.1 Introduzione**

Tra i possibili sviluppi del banco sperimentale risulta di particolare interesse la possibilità di rilevare lo stato di sforzo all'interno del modello durante l'esecuzione di un esperimento. In particolare è stata investigata la possibilità di acquisire in tempo reale la spinta media presente sulla parete all'interfaccia sabbia-silicone, in quanto indicativa dello stato di sforzo medio interno al modello. Attraverso la misura degli sforzi interni al modello si ritiene possano essere studiate eventuali relazioni esistenti tra lo stato tensionale interno e la formazione delle strutture deformative.

#### **4.6.2 Analisi di soluzioni progettuali**

Il problema affrontato, riguarda una funzionalità non ancora implementata all'interno dei laboratori di modellazione di cui si è a conoscenza, lo studio ha quindi previsto una fase iniziale di generazione di idee ed analisi delle diverse soluzioni proposte. Dal punto di vista puramente teorico, basato sulle teorie di meccanica dei terreni, è possibile calcolare lo sforzo necessario

alla deformazione di volume noto di sabbia attraverso la teoria di Rankine di stabilità dei terreni ed attraverso la legge di Coulomb, sulla resistenza al taglio di un terreno.

Dato che risulta difficile, valutare con certezza le numerose variabili necessarie per i calcoli analitici, si è preferito approntare un modello ed una strumentazione di prova per la misura diretta degli sforzi al fine di ottenere una base di informazioni utili alla scelta del sistema di misura definitivo. Il problema principale della misura degli sforzi all'interfaccia tra sabbia e parete di spinta consiste nella difficoltà di scindere gli sforzi generati dal modello rispetto a quelli dati dalle condizioni al contorno. Tale difficoltà ha condizionato pesantemente le valutazioni in fase di scelte della tecnologia adeguata allo scopo. La prima soluzione analizzata prevede il rilevamento della forza necessaria a muovere la parete di deformazione tramite una cella di carico (Figura 4.71).

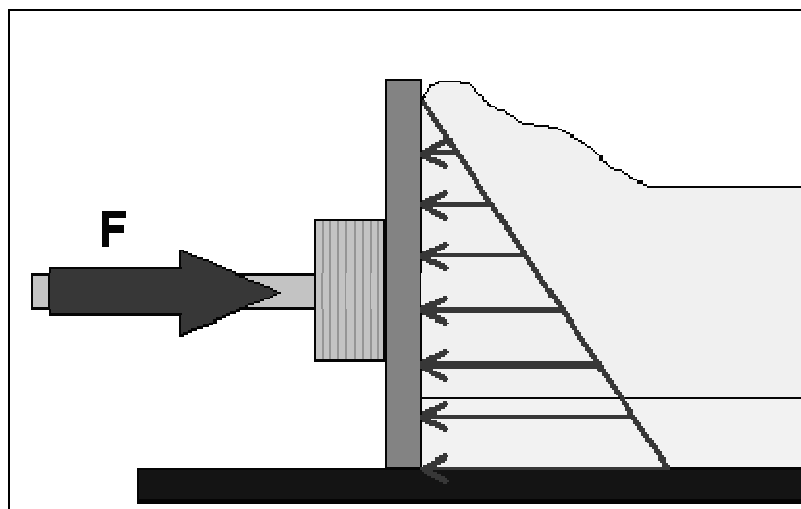


Figura 4.71 Schema modello con cella di carico

Tale apparato si presenta facilmente implementabile, ma sarebbe impossibile discriminare lo sforzo di attrito contro le pareti laterali di contenimento, dalle forze di spinta generate dal modello.

Era stata ipotizzata anche la realizzazione di una parete di spinta al cui interno alloggiare una seconda parete separata dai bordi, ma la costruzione avrebbe comportato complicazioni tecniche eccessive.

La soluzione meccanica è stata quindi abbandonata e si è passati alla valutazione dei sistemi di misura della pressione. Lo schema tipico di tali sistemi di misura prevede l'utilizzo di un sensore che rileva la pressione e la converte in un segnale, tramite un sistema di trasmissione questo giunge al trasduttore che lo riconverte e fornisce il valore di pressione rilevato. L'idea di base era di posizionare un piccolo sensore di pressione commerciale all'interfaccia sabbia/parete e portare esternamente il segnale di pressione.

Una misura di tipo puntuale fornisce sicuramente informazioni molto più utili rispetto al rilevamento di una forza risultante ma dall'analisi di quanto presente sul mercato sono emersi problemi di dimensioni e compatibilità dei normali sensori con la sabbia. E' risultato inoltre indispensabile possedere informazioni, anche di livello qualitativo, su sensibilità e portata necessarie, per valutare in modo sufficientemente critico le alternative disponibili. La soluzione è stata trovata realizzando autonomamente il sensore e portando all'esterno del modello, mediante un collegamento idraulico, il segnale di pressione.

#### **4.6.3 Soluzione adottata e test pilota**

Il sensore ideato consiste in una sottile camera deformabile di dimensioni tali da permetterne il posizionamento tra parete mobile e sabbia (Figura 4.72). La camera è stata realizzata mediante termosaldatura di un comune foglio di polietilene. Tramite un tubo in gomma siliconica la pressione della camera è portata all'esterno, dove può essere facilmente rilevata. Il primo test è servito per verificare la funzionalità del sensore a camera e per determinare sensibilità e portata del trasduttore. La soluzione in assoluto più semplice per la misura delle pressioni consiste nei manometri a tubo inclinato e quindi si è adottata tale configurazione per il modello di test. La camera è stata riempita d'acqua e posizionata sulla parete, si è costruito il modello di sabbia e il tubo di uscita collegato con un secondo teso tra i montanti del telaio come visibile in Figura 4.73, 4.74, 4.75.

Il tubo inclinato è stato riempito d'acqua fino al livello del piano di appoggio del modello, in modo che le variazioni di quota fossero traducibili in incrementi di pressione interna (Figura 4.76).



Figura 4.72 Sensore di pressione

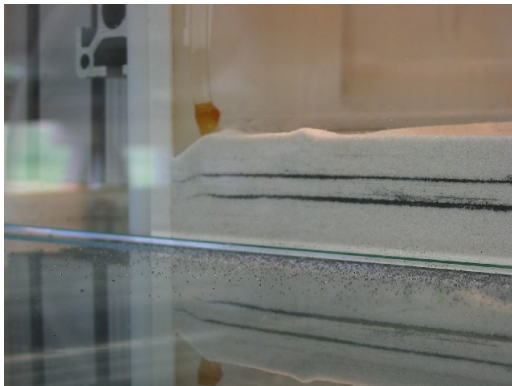


Figura 4.73 Modello



Figura 4.74 Tubo di uscita

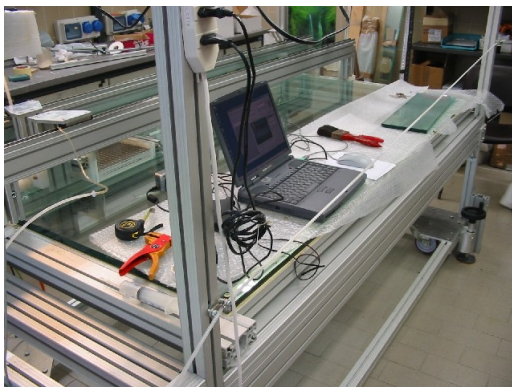


Figura 4.75 Sistema di acquisizione



Figura 4.76 Tubo graduato (freccia)

Lo schema dell'apparato mostra la parete, la camera ed evidenzia le deformazioni del modello in relazione al livello dell'acqua (Figura 4.78).

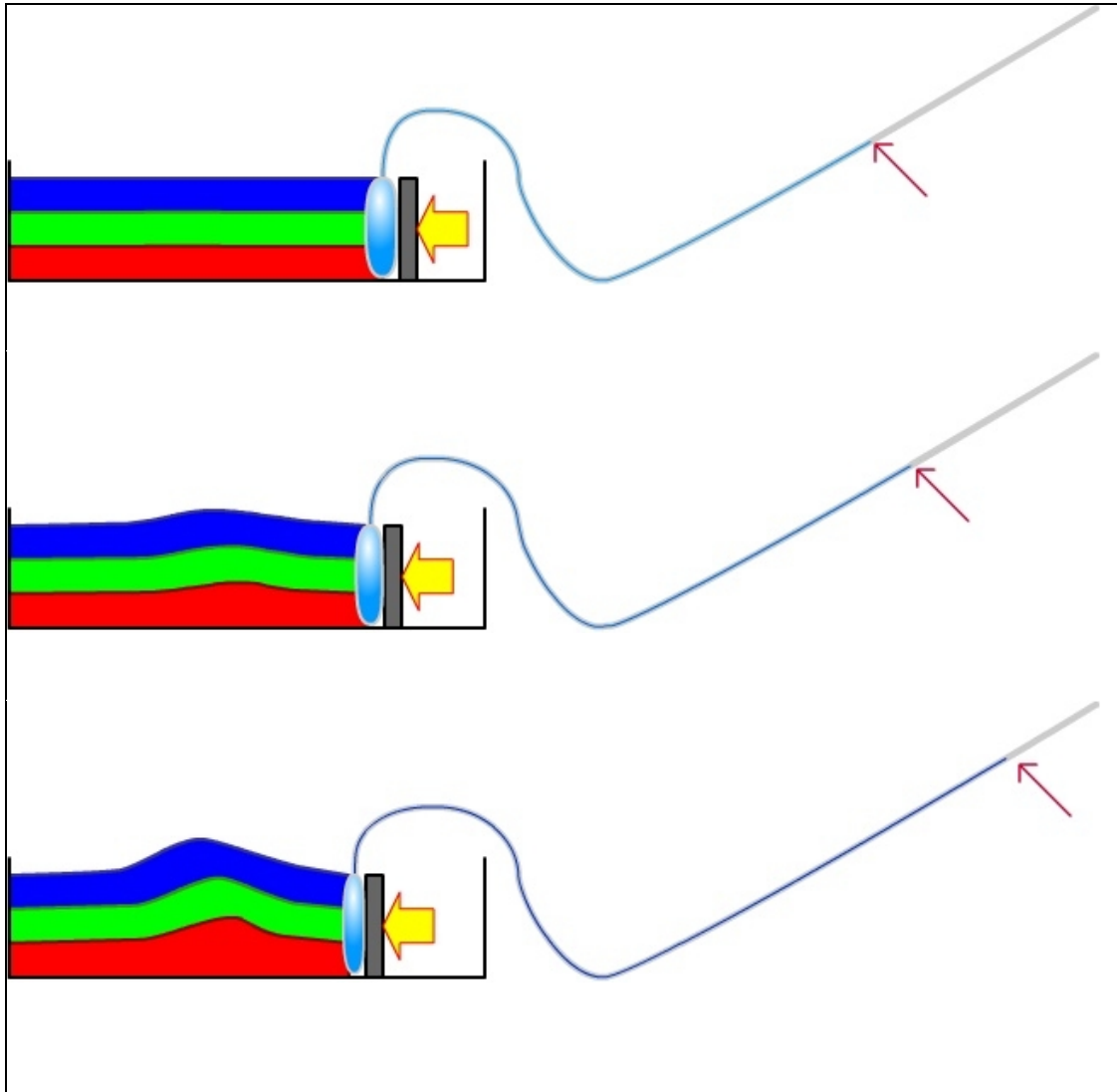


Figura 4.77 Principio di funzionamento del sistema

Nella Figura 4.78 a-f è possibile confrontare l'evoluzione degli strati con la pressione interna alla camera.

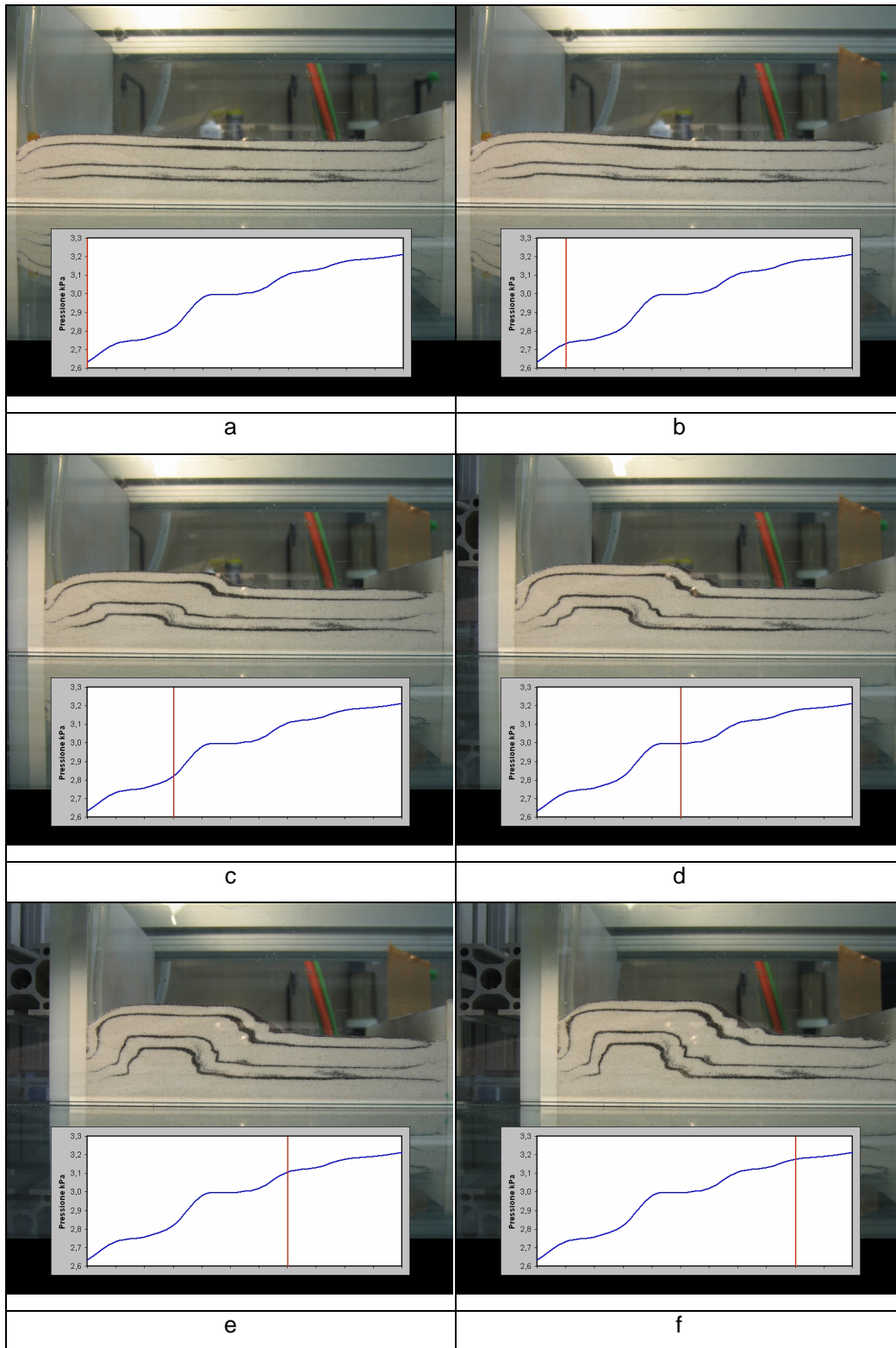


Figura 4.78 a-f Stadi del test

E' immediato osservare che la pressione cresce in modo discontinuo nonostante la parete si muova a velocità costante ed inoltre appare evidente che le discontinuità sono in relazione con la formazione delle strutture.

I dati ottenuti hanno validato la scelta del sistema a sacchetto e hanno consentito di verificare che le variazioni di pressione nell'arco di una prova rimangono inferiori a 2 [kPa].

#### 4.6.4 Modelli di prova per l'acquisizione della pressione

In base alle informazioni ricavate con il test pilota è stato possibile sostituire il manometro a tubo inclinato con uno strumento più sofisticato e effettuare dei test con modelli confrontabili a quelli solitamente realizzati.

Il sacchetto è stato collegato con un sensore di pressione elettronico con uscita in tensione ricevuto in prestito dal dipartimento di ingegneria civile d'Ateneo (Figura 4.79).

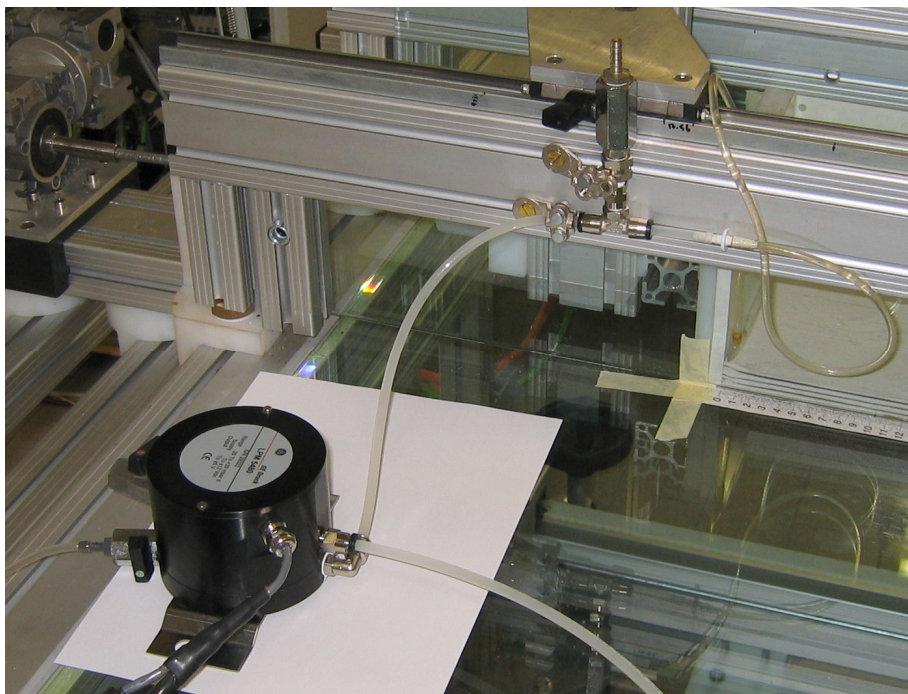


Figura 4.79 Sensore di pressione elettronico

Dato che il sensore è di tipo differenziale la seconda camera è posta in comunicazione con un serbatoio il cui livello è regolabile, in tal modo è stato

possibile disporre nel corso delle prove, di tutta la portata dello strumento :  $\pm 2$  [ kPa ] (Figura 4.80).

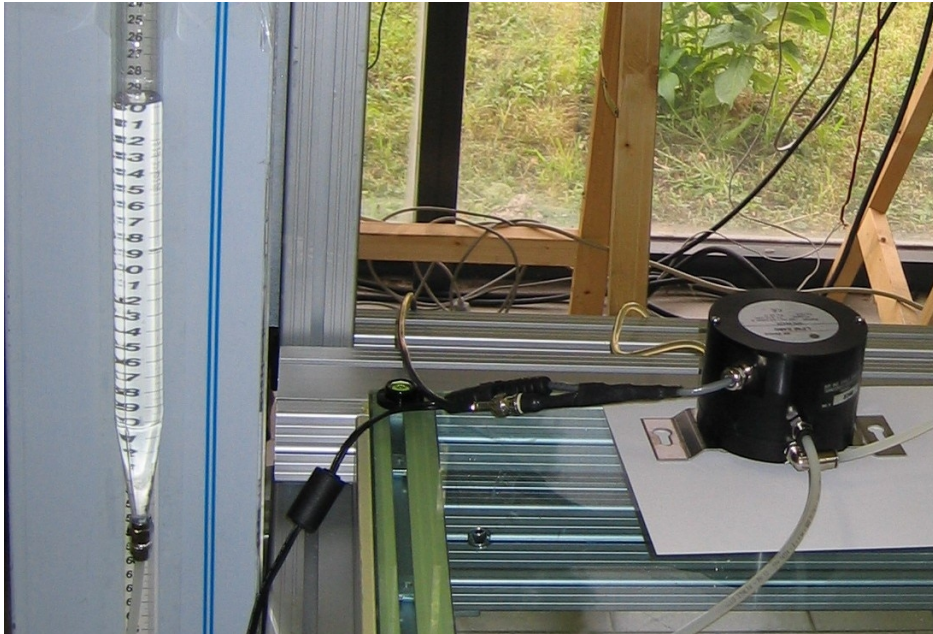


Figura 4.80 Serbatoio

Tramite la scheda DAQ e un programma appositamente scritto in ambiente *Labview®*, è stato possibile acquisire con estrema precisione l'andamento della pressione dei modelli realizzati.

Il primo modello analizzato aveva dimensioni lungo gli assi X e Y di 300x200 [mm] ed uno spessore di 14 [mm]. I modelli scalati dei sistemi reali sono generalmente di dimensioni paragonabili a questo e quindi anche gli sforzi alla parete si possono considerare comparabili.

Nella costruzione del modello non è stato utilizzato silicone in quanto non si è voluto introdurre una ulteriore variabile in questa fase di caratterizzazione dello strumento.

Nei grafici 4.3 e 4.4 si può osservare l'andamento della pressione rilevata, il primo corrisponde ai dati grezzi mentre il secondo ai dati filtrati con l'algoritmo "Loess", in ordinata compare il numero progressivo di acquisizione che è avvenuta ad intervalli di 1[s].

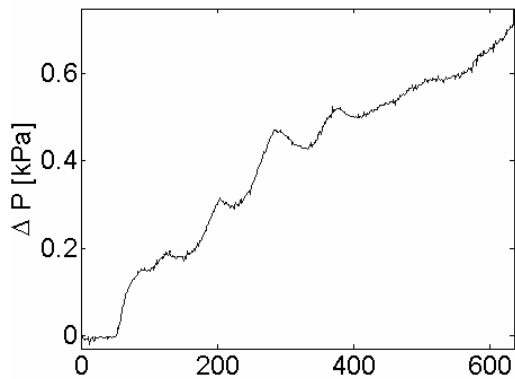


Grafico 4.3

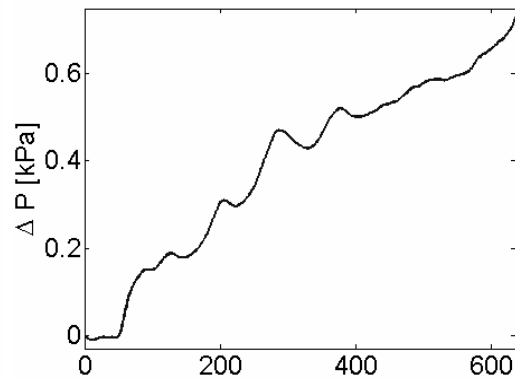
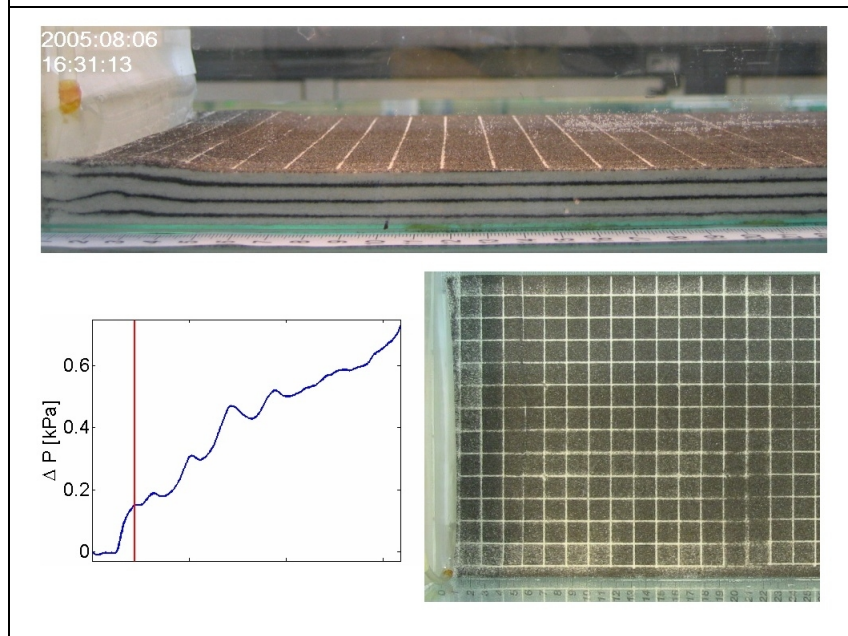
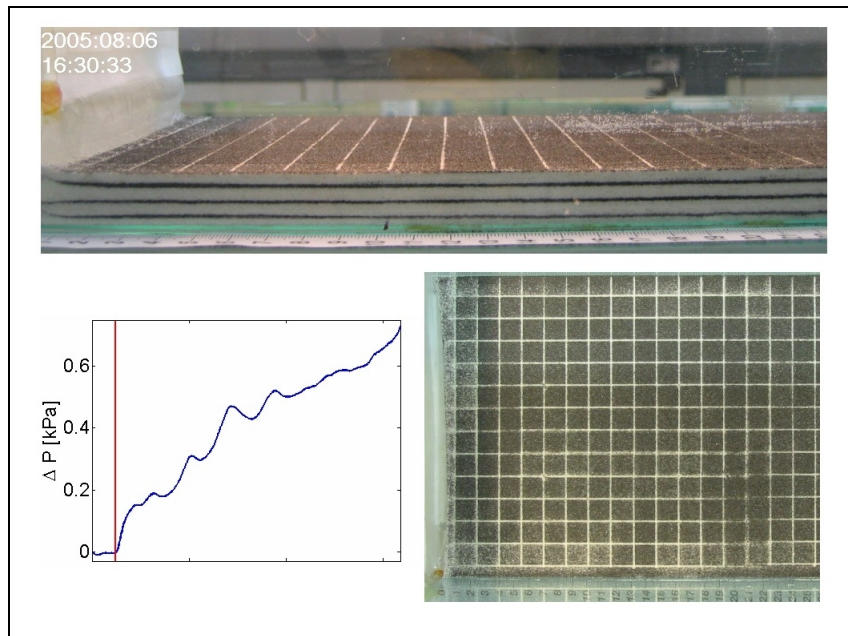


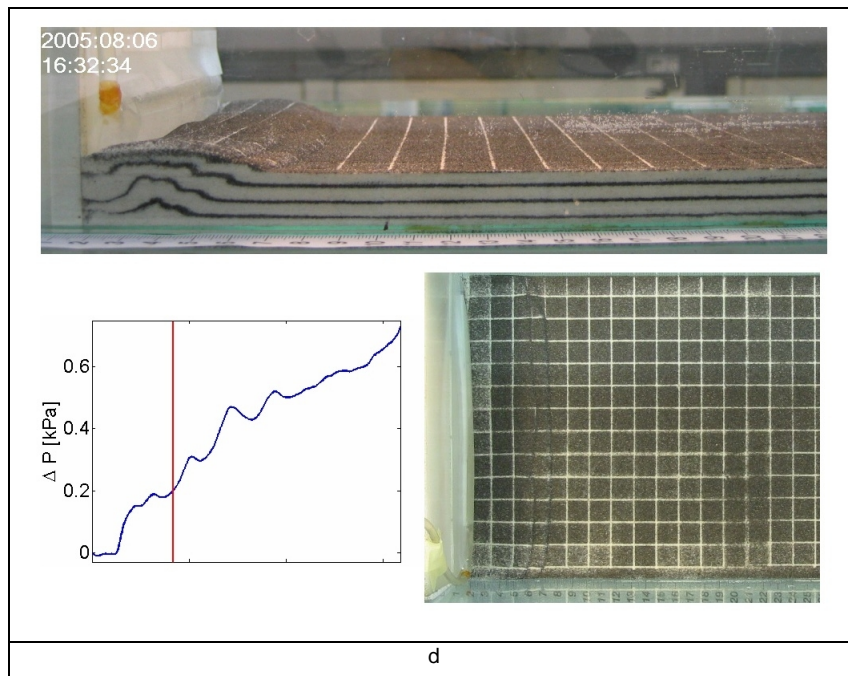
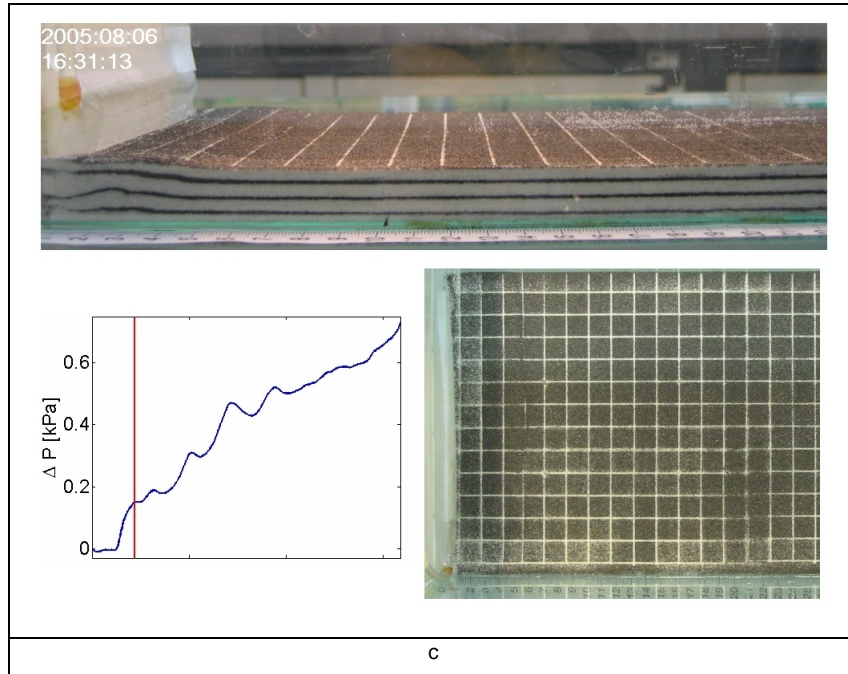
Grafico 4.4

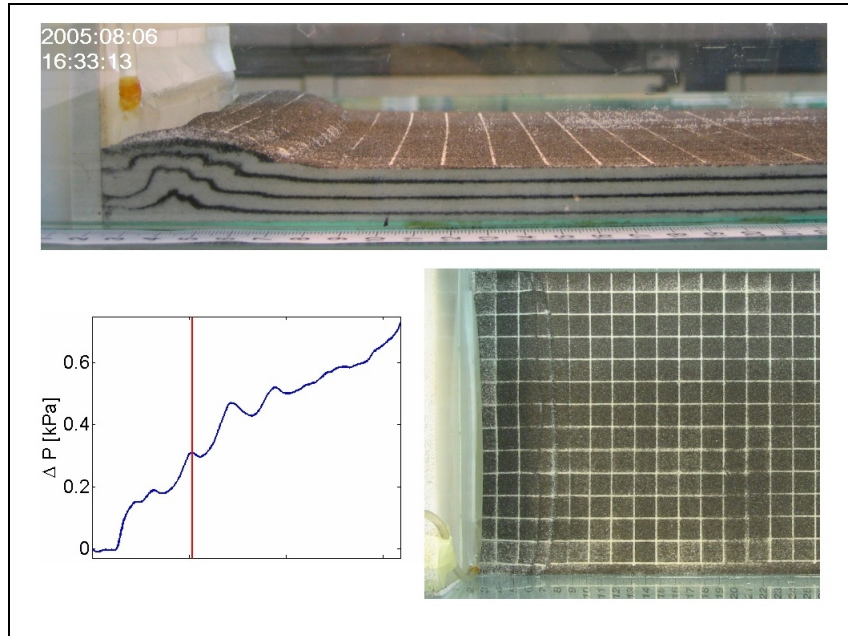
In questa batteria di test sono state acquisite sia le immagini laterali che quelle della superficie del modello, nella Figura 4.81 a-q sono riportate insieme alla pressione istantanea rilevata.

Il secondo modello costruito differiva dal primo per lo spessore, portato a 44 [mm], in quanto si voleva verificare se esistono differenze nelle misurazioni con camera parzialmente o totalmente coperta di sabbia.

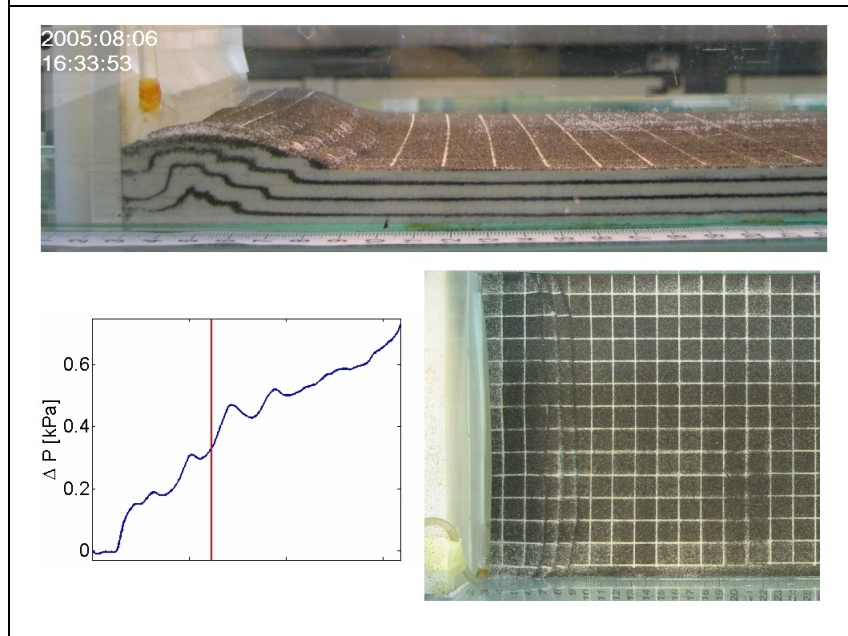
Le fasi più significative della simulazione sono riportate nella Figura 4.82 a-f.



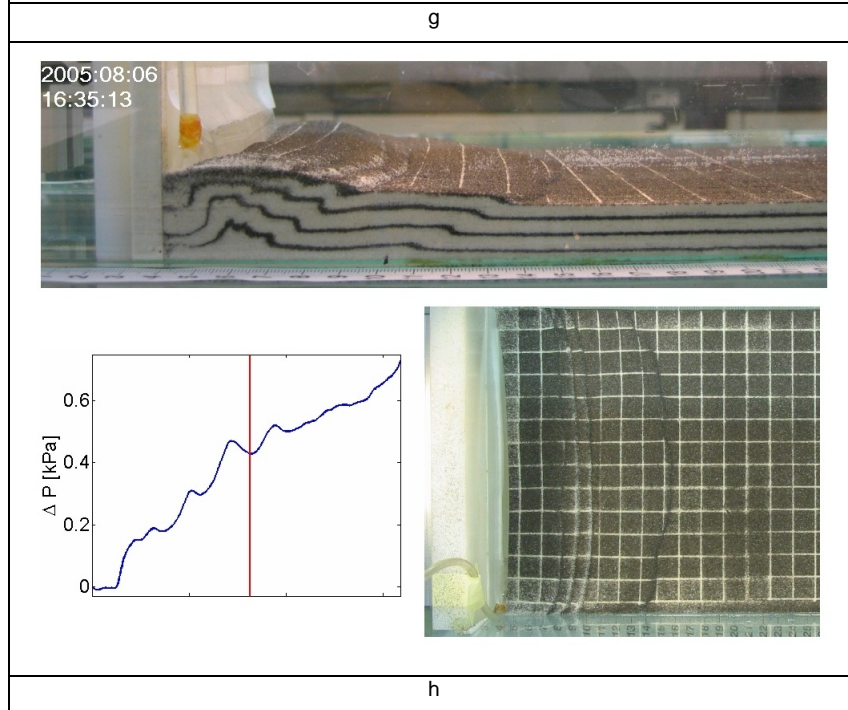
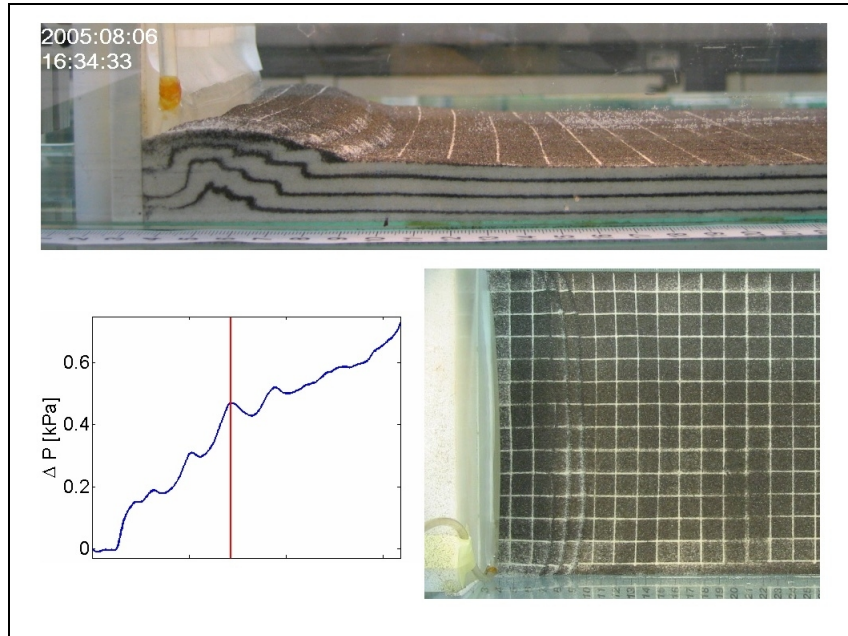


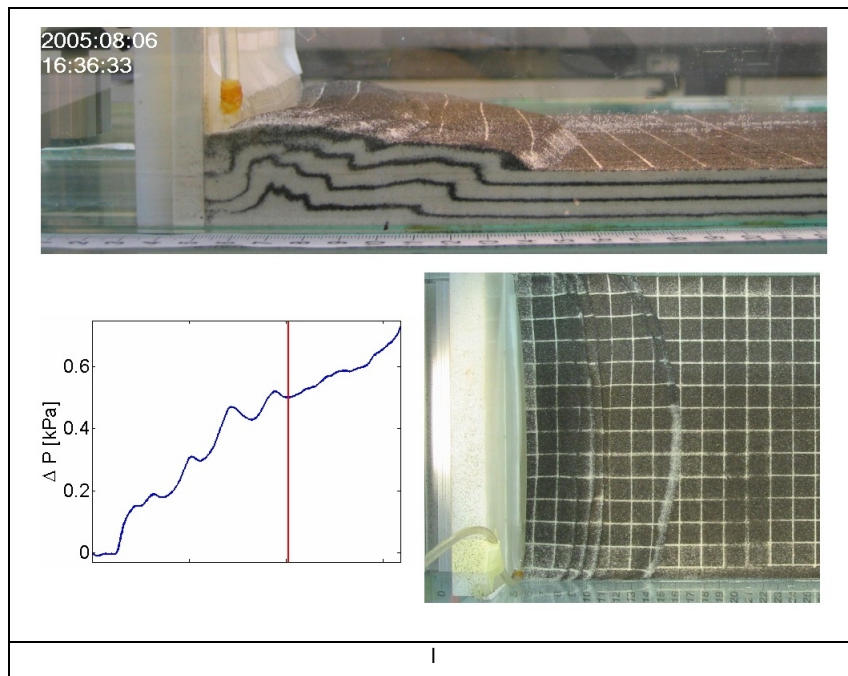
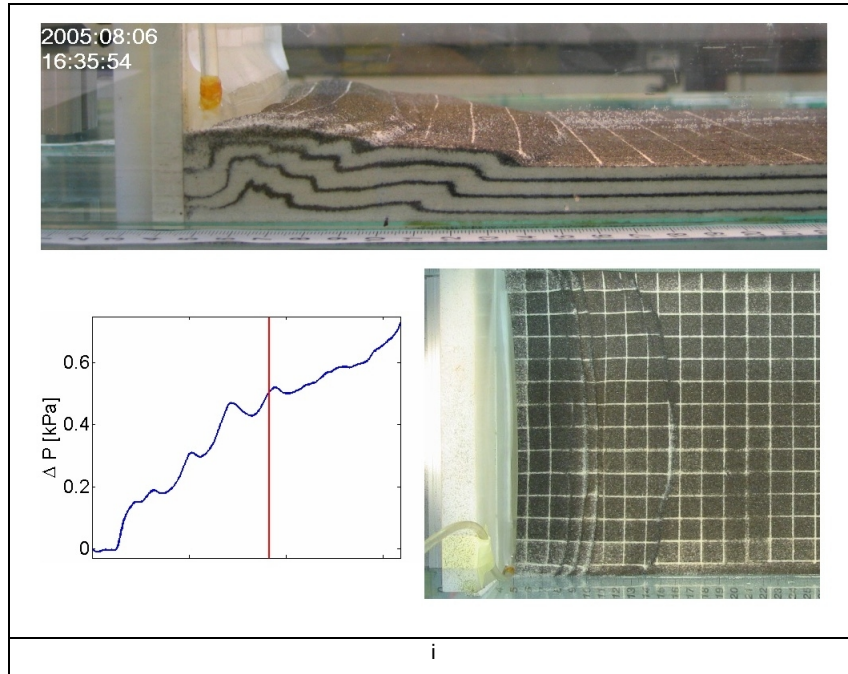


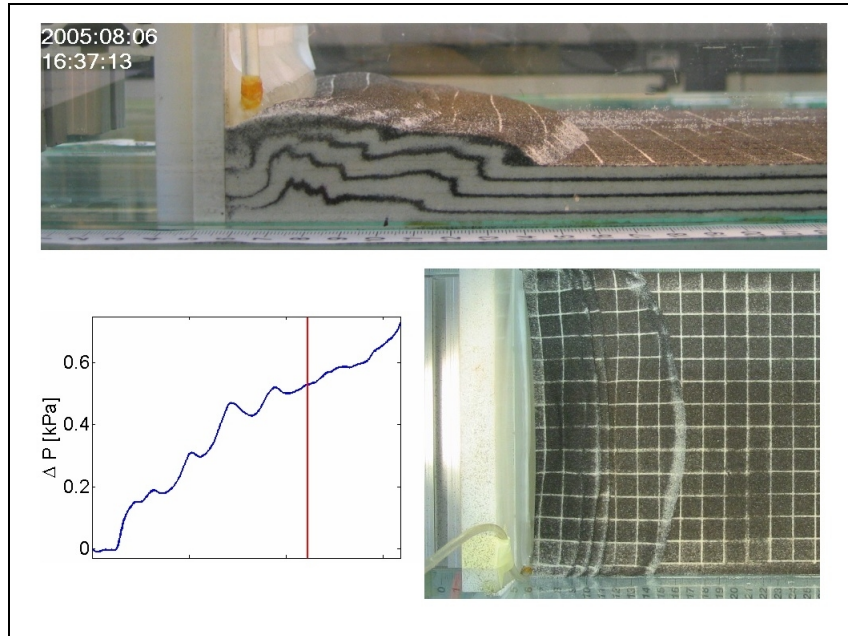
e



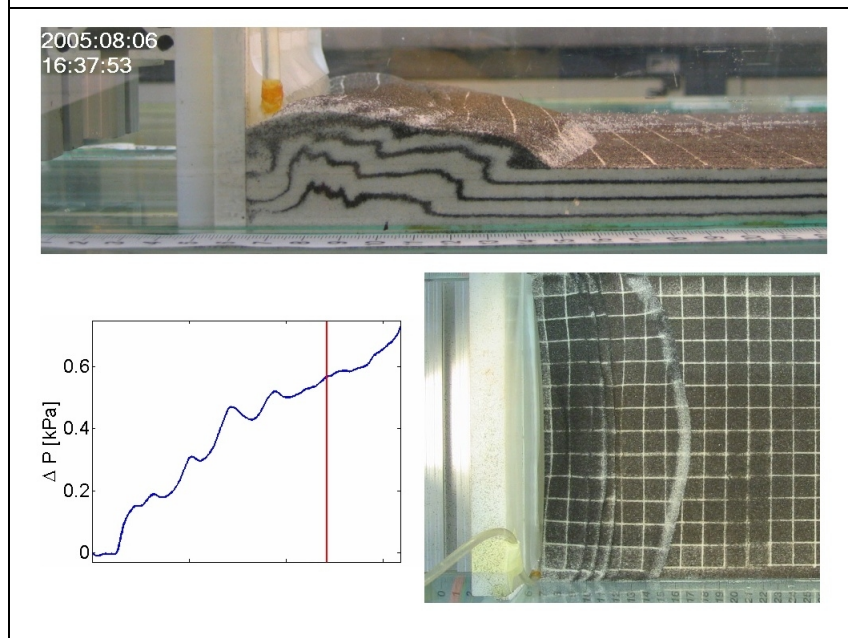
f



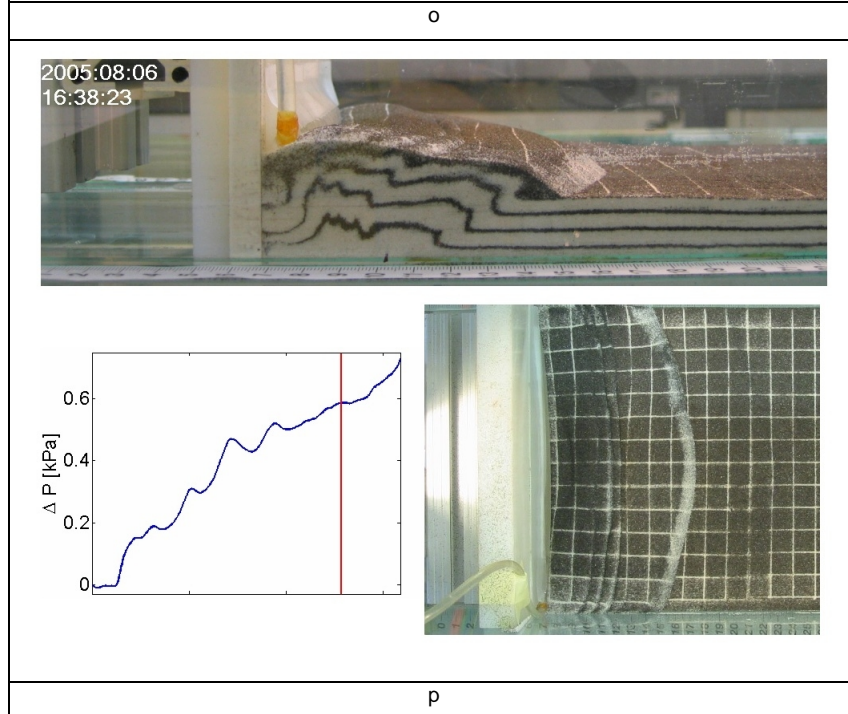
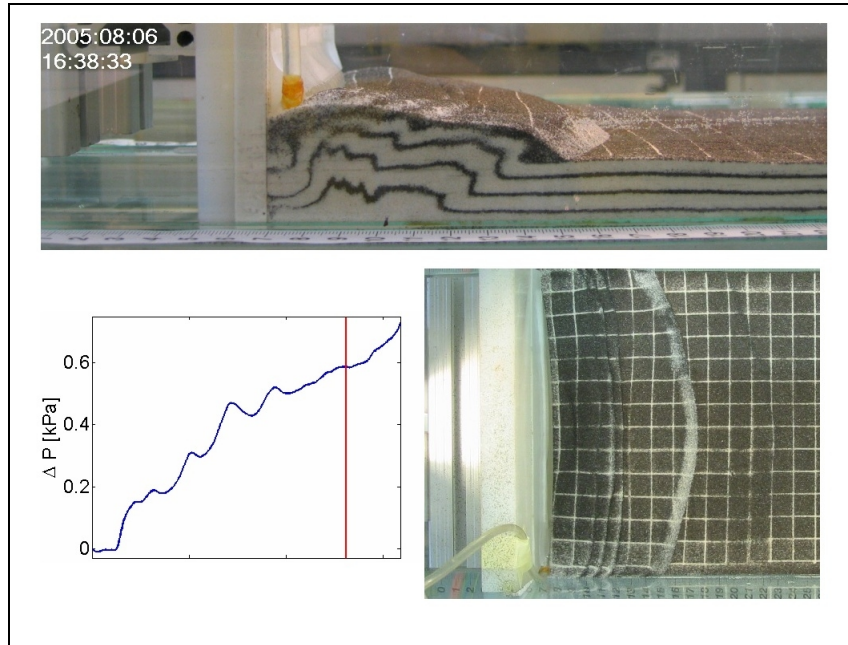




m



n



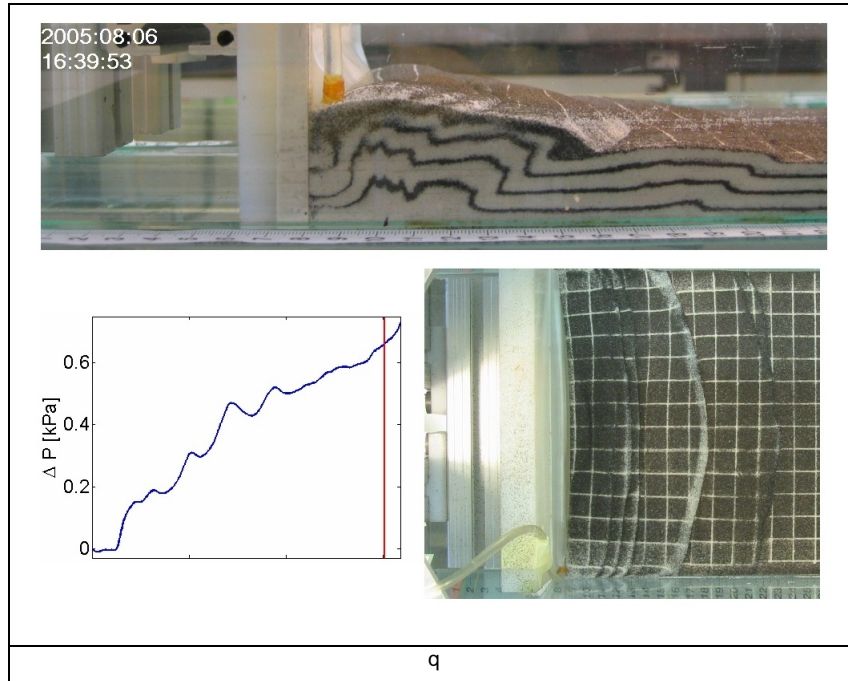
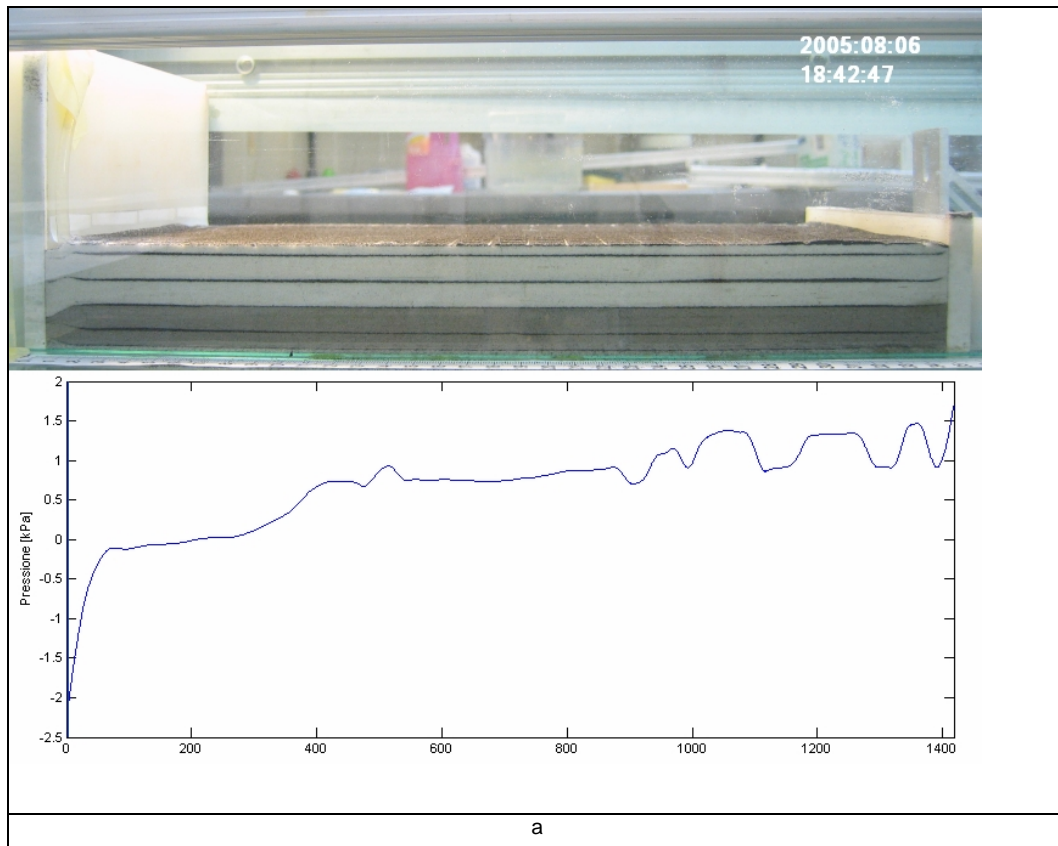
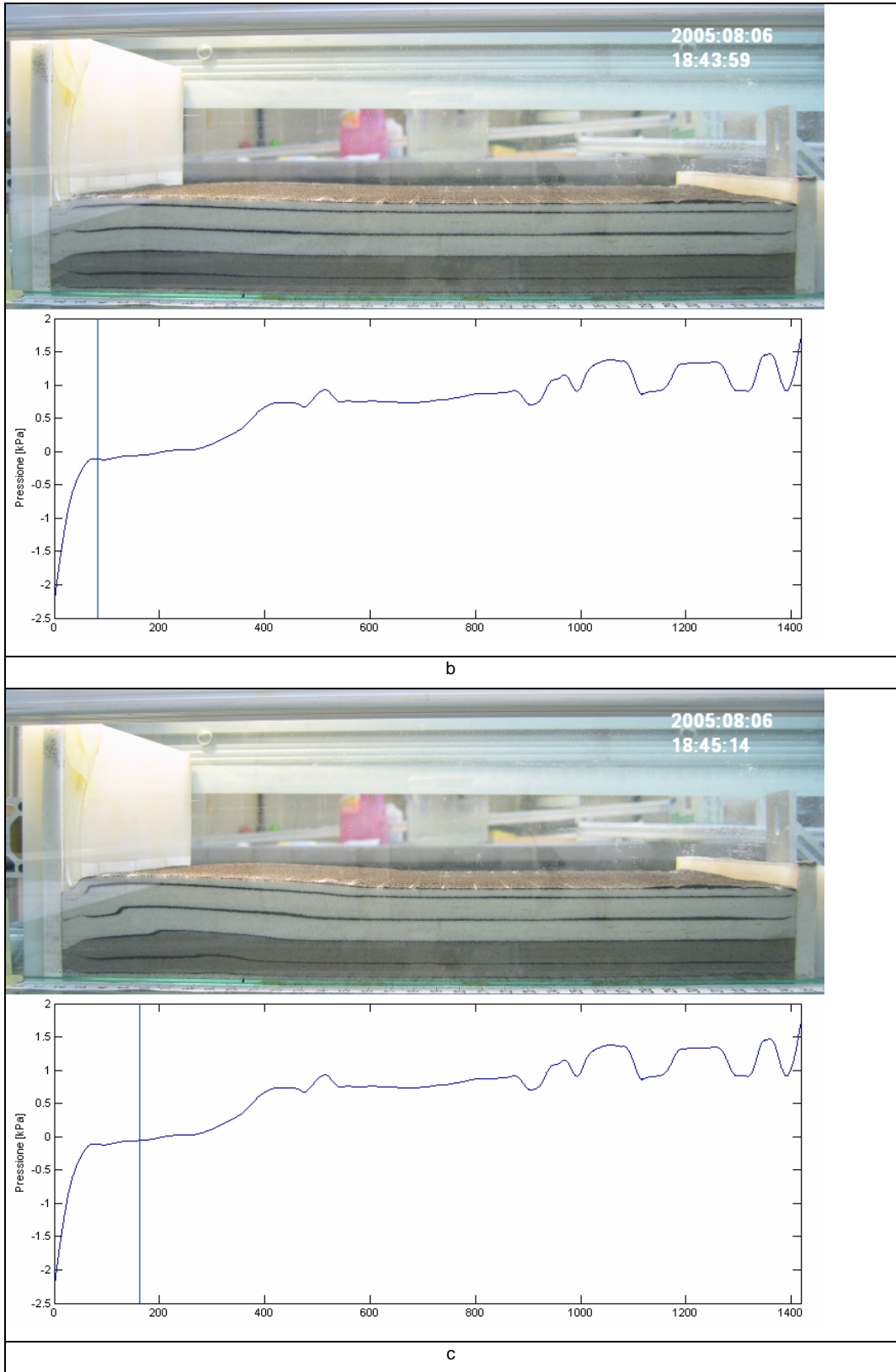
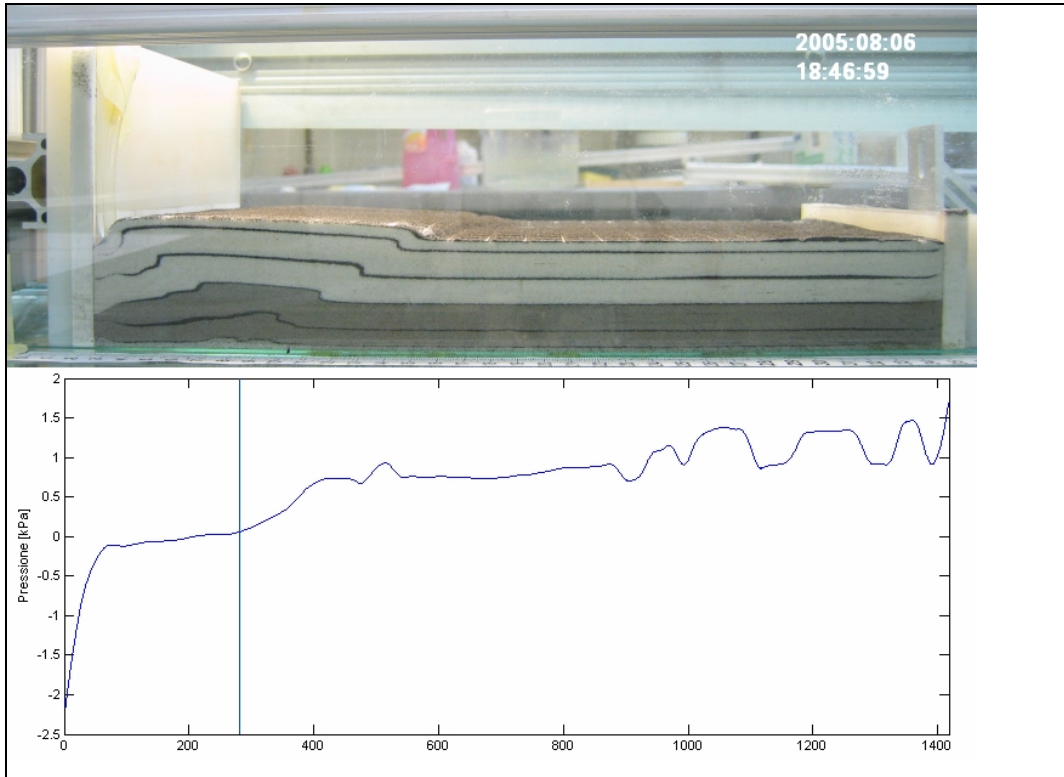


Figura 4.81 a-q Stadi del test pressione

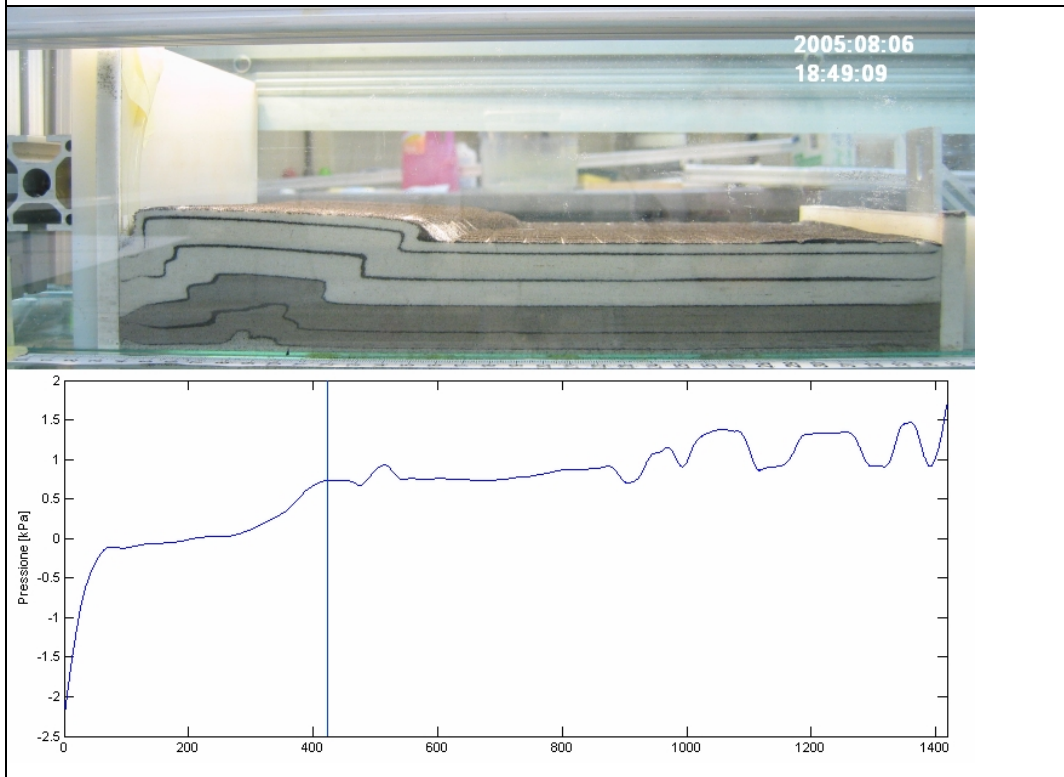


a





d



e

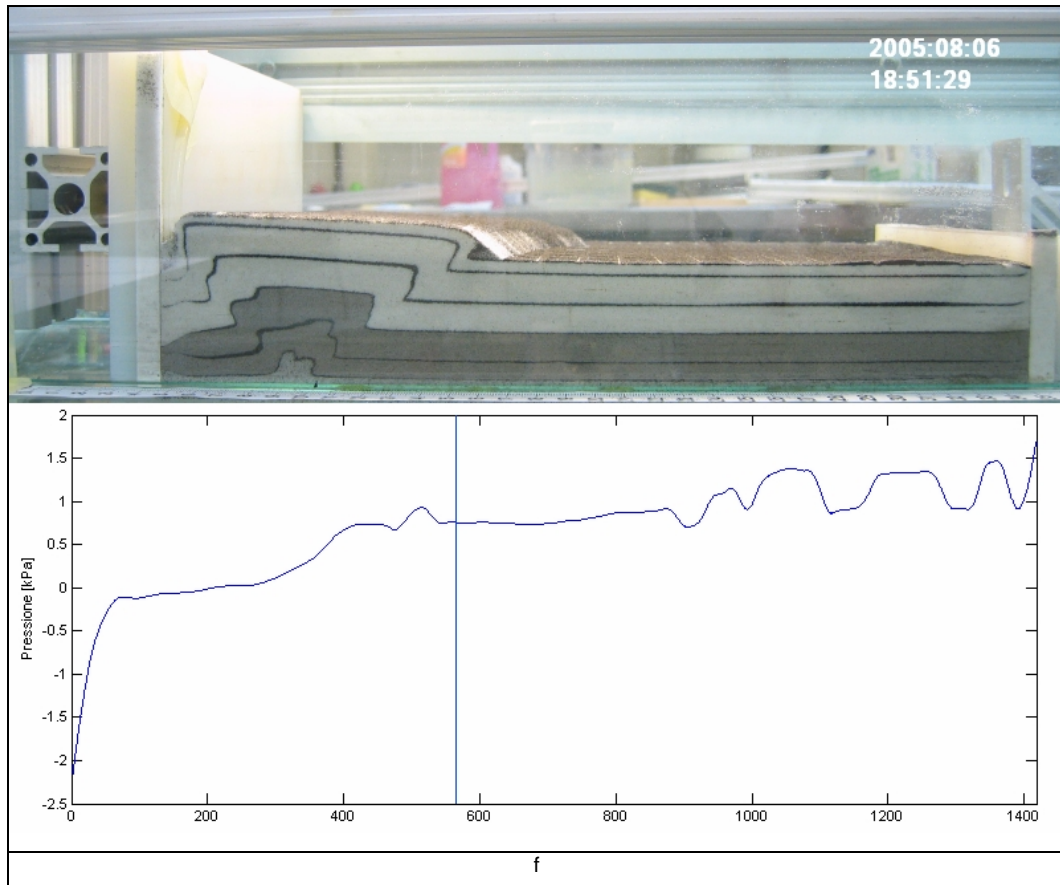


Figura 4.82 Stadi del secondo test pressione

In questa prova sono risultate meno evidenti le correlazioni tra variazioni di pressione e formazione delle strutture ma le dimensioni del modello utilizzato non sono paragonabili a quelle dei modelli solitamente analizzati.

#### 4.6.5 Analisi dei dati e conclusioni

Alla luce dei test svolti il monitoraggio dello sforzo all'interfaccia tra modello e parete mobile appare tecnicamente realizzabile e facilmente integrabile con gli strumenti in dotazione al banco.

Particolarmente interessante risulta il primo test di acquisizione nella quale è risultata particolarmente evidente la relazione tra i picchi di pressione e la formazione delle faglie. In Figura 4.83 sono state riunite le fasi significative dell'evoluzione del secondo modello per evidenziare tale connessione.

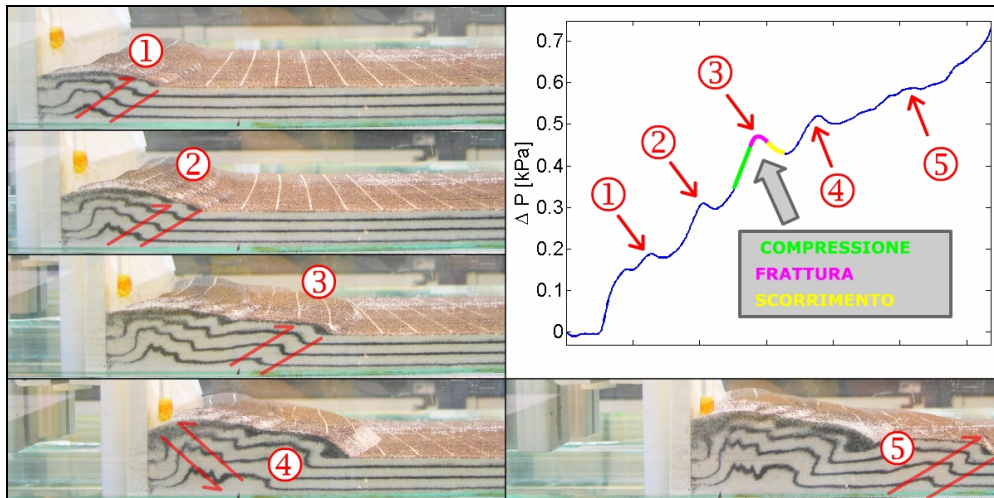


Figura 4.83 Fasi della deformazione

In Figura 4.83 sono associati ai picchi di pressione le faglie che in quel istante si sono formate e sono state evidenziate le superfici di scorrimento.

Si nota che la deformazione si propaga per zone discrete, durante la fase di compressione della sabbia, evidenziata in verde in uno dei picchi, si osserva un rapido aumento di pressione. Questa cresce fino ad un massimo in corrispondenza della formazione di una faglia (tratto rosa), a questo segue una fase di scorrimento reciproco delle superfici di faglia, durante la quale la pressione cala (tratto giallo). La pressione continua a calare fintanto che l'attività della faglia è terminata, per riprendere poi a salire quando entra in attività la faglia successiva.

Un tale comportamento, che in termini energetici si può descrivere come successioni di fasi di accumulo, rilascio e dissipazione, era stato fino ad oggi solo ipotizzato.

Per quanto riguarda il secondo test risultano meno evidenti tali relazioni ma come già accennato il modello non è rappresentativo delle analisi solitamente effettuate e quindi non sarebbe utile ricercare una ottimizzazione.

#### 4.6.6 Sviluppi futuri

La funzionalità di misura dello sforzo medio all'interfaccia parete mobile modello si è rivelata estremamente ricca di spunti per eventuali successive evoluzioni.

Dal punto di vista costruttivo sarebbe interessante sviluppare camere di forma e dimensioni diverse con cui tentare misurazioni di tipo puntuale.

Potrebbe risultare utile anche il confronto di diversi tipi di fluido di varia densità per trasmettere il segnale di pressione.

La possibilità di rilevare la formazione delle strutture deformative rende in prospettiva attuabile la totale automazione del banco. Mediante l'acquisizione in *real-time* è realistico pensare di poter avviare in modo "intelligente" le procedure di scansione che attualmente sono pianificate ad intervalli prestabiliti.

## Cap: V

### MODELLI ANALOGICI

#### 5.1 Modelli in estensione (STA)

##### 5.1.1 Generalità dei margini passivi

Durante i processi di *rifting* e di separazione, la crosta continentale, ai margini dei continenti neoformati, viene assottigliata da strutture estensionali. Con la formazione di crosta oceanica e con il progressivo allontanamento dei margini continentali dalla dorsale medio-oceanica, la crosta oceanica tende a raffreddarsi. Il raffreddamento provoca un aumento della densità innescando un processo di subsidenza. La parte di crosta continentale lentamente scende sotto il livello del mare, andando a formare un *mare epicontinentale* che si estende sopra la piattaforma continentale. Il fenomeno della subsidenza legato al notevole apporto sedimentario possono dare origine a potenti sequenze di materiale sedimentario. Il fenomeno della subsidenza provoca anche una variazione dell'angolo di *slope* originario, il valore medio dell'angolo di *slope* dei margini passivi è di circa 4-5° (margini Pacifico > 5°; margini Atlantici ~ 3°) (Barr, 1992). Spesso, durante le fasi di *rifting*, si generano le condizioni ambientali per la deposizione di sedimenti evaporitici (vedi cap I). In alcuni margini passivi il sale si forma nella fase *post-rift* (es. Golfo del Messico), e persino dopo la fase di *break-up* (margini sud-atlantici; JACKSON ET AL., 2000), cosicché anche il substrato delle evaporiti può essere molto variabile.

La storia evolutiva dei margini passivi influenza inoltre fortemente le caratteristiche dei singoli sistemi, come: le variazioni dello *slope* nel tempo; variazioni nei tassi di subsidenza termica così come in quelli di subsidenza legata all'apporto ed alla distribuzione dei sedimenti. Da un punto di vista generale l'inclinazione verso il bacino è incrementata dalla subsidenza termica differenziale e dal sollevamento dell'adiacente cratone, mentre è diminuita dal carico dei sedimenti prossimali (Figura 5.1).

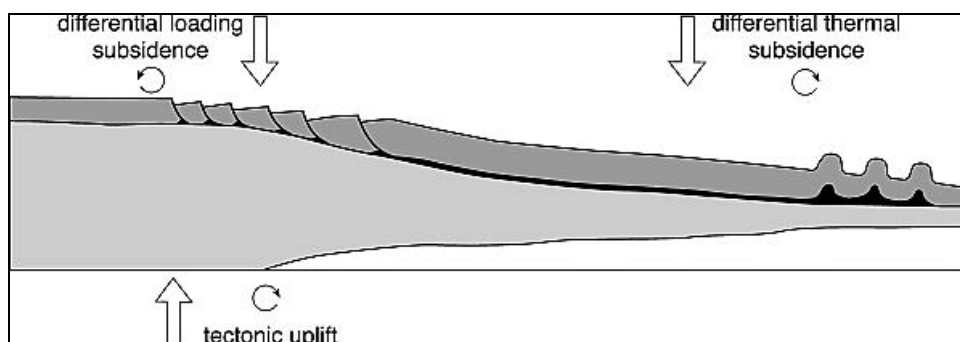


Figura 5.1. Margine passivo in cui la subsidenza termica differenziale e il sollevamento del cratone fa aumentare l'inclinazione del bacino (da JACKSON ET AL. 1995)

Un esempio di margine con pendenza basale verso il bacino incrementata sia da subsidenza termica che da sollevamento cratonico è rappresentato dal margine dell'Angola (W Africa; CRAMEZ AND JACKSON, 2000) (Figura 5.2) . Un esempio di margine con slope basale debolmente pendente verso il continente a causa del peso dei sedimenti progradanti è quello del Golfo del Messico (ROWAN ET AL, 2004 e referenze riportate; WU ET AL.; 1990). I margini passivi sono spesso caratterizzati da ampie zone deformate a causa di movimenti gravitativi innescati dall'inclinazione del basamento o dall'inclinazione della superficie topografica verso il bacino. In numerosi margini passivi i livelli di scollamento sono rappresentati sia da evaporiti e da sale (Figura 5.3 frecce), sia da livelli argillosi in sovrappressione di fluidi.

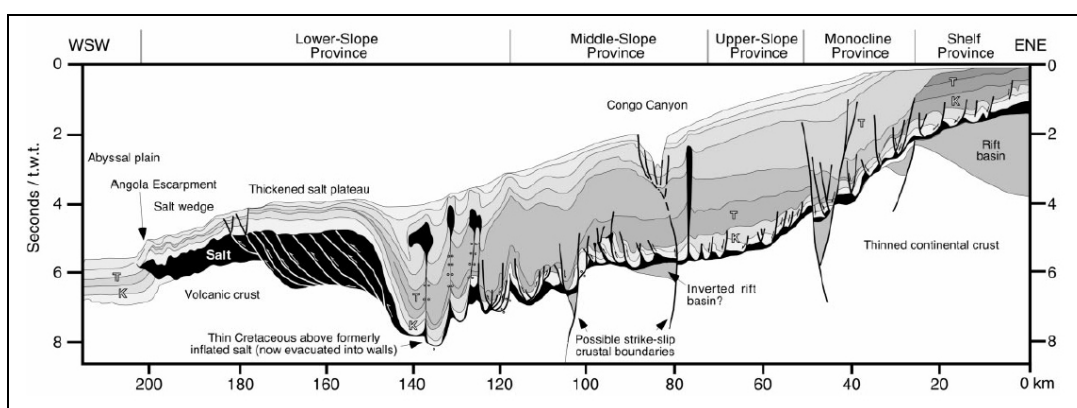


Figura 5.2 Line drawing del margine ovest dell'Africa (Angola) (Maudit

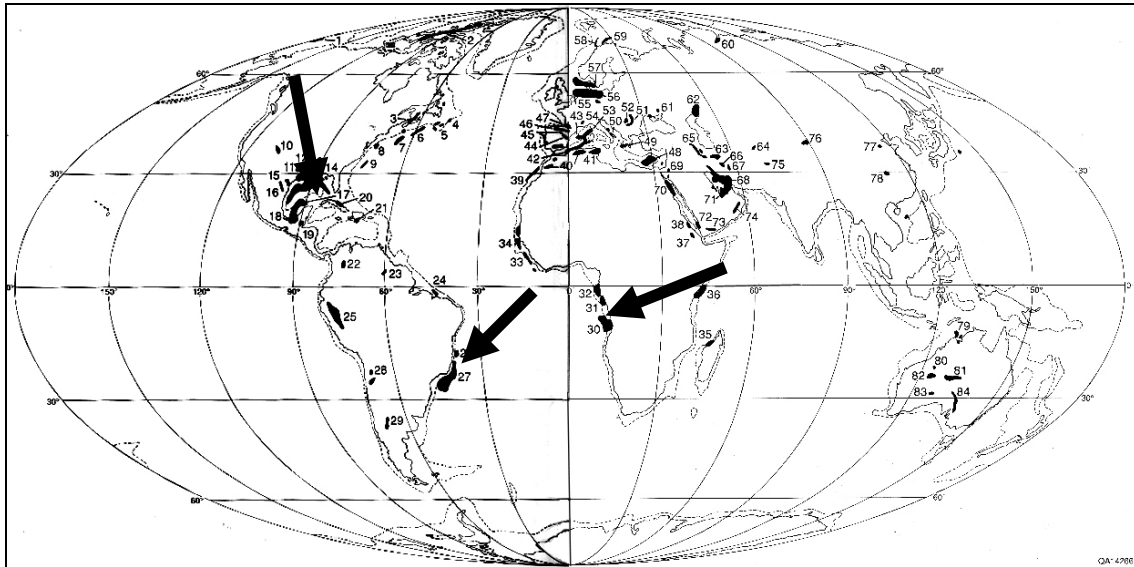


Figura 5.3 Margini passivi con presenza di sale (in nero)

La deformazione nei margini passivi risulta dalla combinazione di scivolamento (*gravity gliding*) e collasso (*gravity spreading*) gravitativi. Lo scivolamento gravitativo è definito come la traslazione di un corpo lungo una superficie inclinata, con vettori di movimento paralleli a quest'ultima. (Figura 5.4 - a). Il collasso gravitativo è un collasso verticale con connesso allargamento orizzontale di un corpo dovuti al suo stesso peso, a causa dell'inclinazione della sua superficie superiore (Figura 5.4 - b). In realtà è difficile differenziare il movimento dovuto alle due diverse cause (Figura 5.4 - c), che spesso agiscono insieme quando il corpo considerato ha le caratteristiche reologiche del sale.

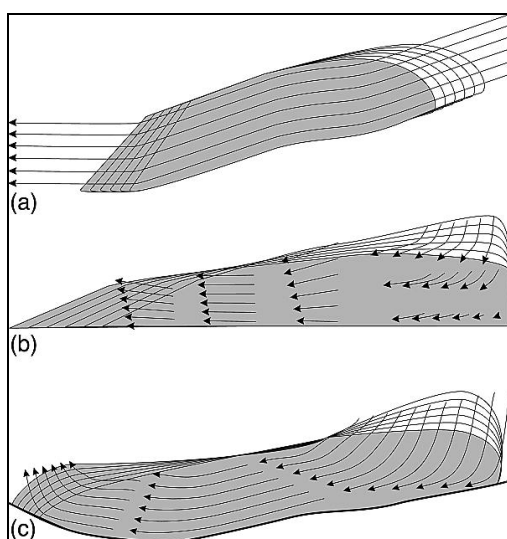


Figura 5.4 Esempi di deformazione gravitativa: a) *gravity gliding* in cui un blocco rigido scivola lungo il livello di scollamento; b) *gravity spreading*, in cui un blocco si deforma sotto l'effetto del proprio peso causando un collasso verticale e *spreading* laterale; c) deformazione mista (da JACKSON ET AL. 1995)

Le zone sono deformate da una tettonica di tipo *thin-skinned* estensivo nella parte prossimale (*updip*) del sistema, mentre nella parte frontale (*downdip*) le strutture sono di tipo compressivo (vedi p. prec. Figura 5.2). Nella parte frontale in compressione, spesso si ritrovano strutture rappresentate da *thrust* e pieghe con sviluppo di *fold-belts* associate a fuoriuscite laterali di sale proveniente sia da diapiri già in posto (VENDEVILLE E NILSEN, 1995; ROWAN ET AL., 2000), sia da estrusione e compressione di altre strutture saline (*salt nappes*). Le strutture appena descritte sono accompagnate spesso da fenomeni a piccola scala che influenzano in misura minore l'accorciamento del sistema; tali fenomeni sono la compattazione, *pressure solution*, pieghe a piccola scala.

La tettonica salina è presente in numerosi bacini sedimentari dei margini passivi, per esempio nel Golfo del Messico (e.g., WORRALL & SNELSON, 1989; WU ET AL., 1990; DIEGEL ET AL., 1995; PEEL ET AL., 1995; TRUGILL ET AL., 1999; ROWAN ET AL., 2000), nel margine *offshore* dell'est Brasile (e.g., DEMERICAN ET AL., 1993; COBBOLD ET AL., 2001; MODICA & BRUSH, 2004), nei margini *offshore* dell'ovest Africa (e.g. DUVAL ET AL., 1992; MARTON ET AL., 2000; TARI ET AL., 2002) e nel margine atlantico canadese (e.g., WADE & MACLEAN, 1990; YASSIR & BELL, 1994; KIDSTON ET AL., 2002, SHIMELD, 2004).

### 5.1.2 Modellizzazione dei margini passivi

Le strutture di deformazione che interessano sistemi geodinamici in cui vi è la presenza di sale, mostrano cinematiche e geometrie del tutto particolari, per questo motivo si può parlare di un vera e propria *tettonica salina*. Queste particolarità dipendono dalle caratteristiche reologiche del sale (cfr. reologia del sale), che ha un comportamento viscoso sia in superficie sia in contesti di bassa profondità, mentre le rocce circostanti si deformano in modo fragile. Poiché il sale ha una bassa resistenza, inizia a deformarsi sotto l'azione della gravità prima della deformazione della sovrastante copertura sedimentaria. Per queste ragioni, anche se il sale è molto più debole della copertura (COSTA E VENDEVILLE, 2002), è possibile comprendere come il sale inneschi una deformazione, almeno nelle prime fasi della tettonica gravitativa. Questo capitolo va ad analizzare la cinematica di modelli estensionali-gravitativi, in

particolare verranno descritte sia le porzioni marginali in cui si ha estensione per *spreading* e/o *sliding* dello scollamento viscoso, sia le porzioni frontali in cui vi è compressione. Nella prima parte si analizzeranno i fattori che controllano la geometria e la cinematica delle strutture estensionali formate al margine della piattaforma e lungo lo *slope*, nella seconda parte si analizzeranno i parametri che influenzano la geometria e la cinematica delle strutture compressive presenti al fronte.

### 5.1.3 Obiettivi dei modelli

Questo set di modelli è stato progettato per capire l'influenza dei seguenti parametri : spessore del sale, spessore della copertura, angolo dello *slope*, su geometria della deformazione, dimensioni e localizzazione della aree deformate e la sequenza di nucleazione e di crescita delle strutture.

Per chiarire al meglio le cause/effetto, sono stati progettati due set di modelli in cui si sono analizzate le strutture estensionali formate nella parte interna del bacino (*upslope*) e le strutture compressive formate nella parte frontale o esterna del modello (*downslope*). La sedimentazione sin-tettonica, in questo set di modelli non è stata applicata, per evitare di inserire una ulteriore variabile nel sistema.

Il primo set di modelli è stato progettato eliminando ogni tipo di costrizione fisica nella parte frontale del modello (*downslope*), nel secondo set di modelli invece è stato simulata la chiusura del bacino. Nei modelli, il livello di scollamento viscoso è stato riprodotto con gel di silicone (SGM36), e la copertura fragile con sabbia quarzosa anidra (Tab 5.1). L'acquisizione di fotografie durante la deformazione dei modelli, ha permesso la ricostruzione dei tempi di formazione delle strutture e della loro crescita. Alla fine della deformazione i modelli sono stati inumiditi, sezionati e fotografati in diverse sezioni trasversali

MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE MATERIALS USED IN THE MODELS				
Materials	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Grain size ( $\mu$ m)	Angle of internal friction $\phi$	Dynamic shear viscosity $\eta$ (Pa s)
Sand	1.75	300	30°	----
Silicone	0.976	----	----	2 x 10 <sup>4</sup>

Tab. 5.1 Caratteristiche dei materiali analogici utilizzati

### 5.1.4 Primo set di modelli

I dati presentati in questo capitolo, mostrano le geometrie e la cinematica di otto modelli deformati per estensione gravitativa (Tab 5.2). Tutti i modelli hanno le stesse dimensioni di larghezza e lunghezza (200x200 mm), il fronte dei modelli è libero, in tal modo si è permesso al silicone di fluire grazie al proprio peso e al peso della copertura fragile.

GEOMETRIC AND KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE MODELS						
Model	Thickness of sand (mm)	Thickness of silicone (mm)	Slope (°)	Total time (h, m)	Final length of model (mm)	Total extension (%)
STA2	18	10	0°	05, 00	260	30
STA3	18	10	6°	04, 30	284	42
STA4	10	5	0°	08, 00	226	13
STA5	10	5	6°	07, 35	252	26
STA7	10	10	6°	05, 00	280	40
STA8	10	10	0°	06, 40	250	25
STA9	5	5	6°	13, 45	255	27,5
STA10	5	5	0°	22, 15	230	15

Tab. 5.2 Caratteristiche geometriche e cinematiche del primo set di modelli

Nei modelli sono state testate le seguenti variabili: 1) spessore del livello viscoso, 2) spessore della copertura, 3) rapporto degli spessori fragile/duttile (B/V) e 4) l'angolo di *slope* (Tab 5.2). Tutti i modelli sono stati deformati per gravità senza inserire nessun tipo di vincolo, in pratica si sono deformati fino al massimo consentito dallo *spreading* del silicone. Il tempo di deformazione totale si è dimostrato molto variabile tra i modelli (Tab. 5.2) ed è in funzione sia dagli spessori che dall'inclinazione dello *slope*.

### 5.1.5 Risultati

Dai *line drawing* delle sezioni centrali si possono notare una serie di strutture estensionali rappresentate da faglie normali che delimitano dei blocchi tiltati, e dei *graben* sia simmetrici che asimmetrici (Figura 5.5, 5.6). In tutti i modelli, la maggior parte delle faglie si formano entro i primi 2,5 cm di estensione, queste strutture successivamente evolvono in *graben* oppure delimitano blocchi tiltati.

1) Modelli orizzontali (Figura 5.5)

- 1a) Non sono deformati nella parte al retro
- 1b) Mostrano una propagazione della deformazione dal fronte, verso il retro (break-back)
- 1c) La lunghezza dell'area deformata al fronte è proporzionale allo spessore del silicone, ma inversamente proporzionale allo spessore della copertura

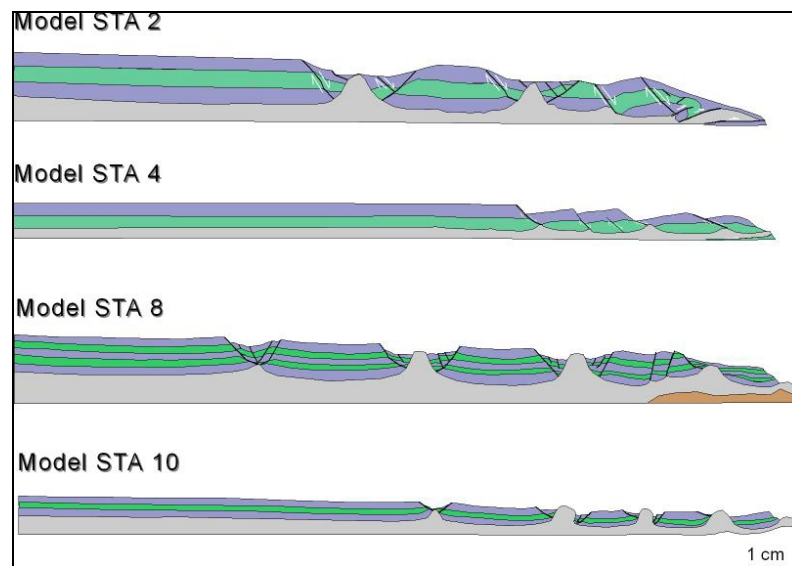


Figura 5.5 Modelli deformati con un angolo di slope pari a 0°

## 2) Modelli inclinati (Figura 5.6)

- 2a) Presentano aree deformate sia al fronte (con propagazione della deformazione verso il retro) sia al retro (con propagazione della deformazione verso il fronte);
- 2b) Le strutture deformative si sviluppano secondo una sequenza di tipo *back-and-forth*;
- 2c) La sequenza di formazione delle faglie tende a convergere verso il centro del sistema, le faglie che si formano al retro immergono verso il fronte e convergono verso il centro, le faglie che si formano al fronte, invece, immergono verso il retro e convergono verso il centro. Le faglie coniugate si formano subito dopo, per dare origine a *graben*;
- 2d) Si notano due zone di deformazione con ampiezza proporzionale sia all'angolo di slope ( cfr. MAUDUIT ET AL. 1997) sia allo spessore dell'angolo di *slope* e, inversamente proporzionali allo spessore della copertura:

2e) Le due zone di deformazione convergono verso il centro fino ad unirsi solo nei modelli con spessore maggiore (Sta3, Sta7)

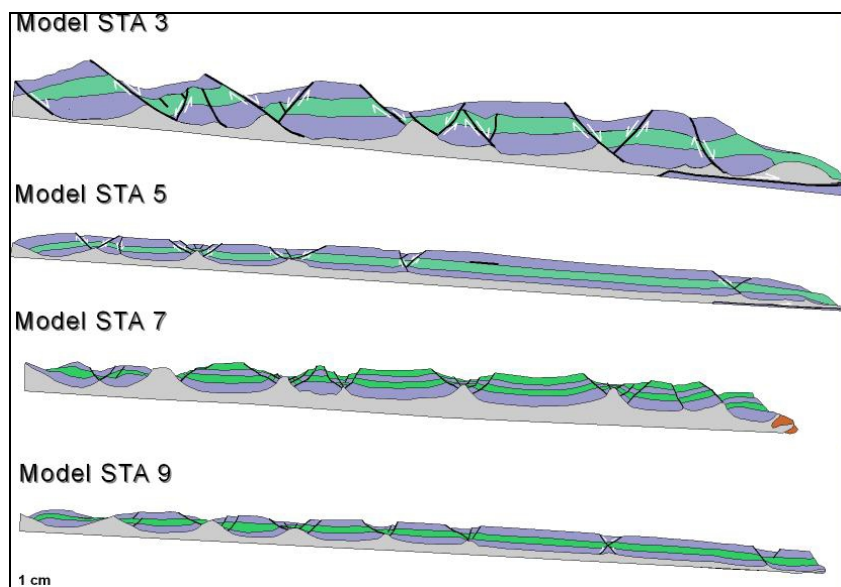


Figura 5.6 Modelli deformati con un angolo di slope di 6°

### 5.1.6 Secondo set di modelli

I dati presentati in questa sezione mostrano le differenze nella geometria e nella cinematica di due modelli deformati per gravità. I due modelli hanno le stesse condizioni iniziali, eccetto per la lunghezza lungo la direzione di estensione (tab.5.3)

Characteristics of Models STA11 and STA12					
Model	Thickness of sand (mm)	Thickness of silicone (mm)	Slope (°)	Model length (mm)	Model width (mm)
STA11	10	5	6°	900	600
STA12	10	5	6°	400	600

Tab. 5.3 Caratteristiche geometriche e cinematiche del secondo set di modelli

Questi modelli, a differenza del set precedente, sono stati confinati nella parte frontale apponendo uno spessore di sabbia contro cui il silicone si chiude. Nei modelli è stato testato l' effetto della variazione del rapporto tra lunghezza e larghezza mantenendo invariati gli altri parametri. Questo per valutare quanto la

forma del bacino salifero influenzi la deformazione. I modelli sono stati lasciati deformare fino al loro massimo consentito, che è variato nei due modelli da 50 ore dello STA 11 a 53 ore dello STA 12.

### 5.1.7 Risultati

Nei due modelli sono state riprodotte delle strutture che si formano nelle zone *upslope* e *downslope* dei margini passivi, in presenza di un livello viscoso (sale). Le due parti deformate, sono separate da un'area indeformata (Figura 5.7).

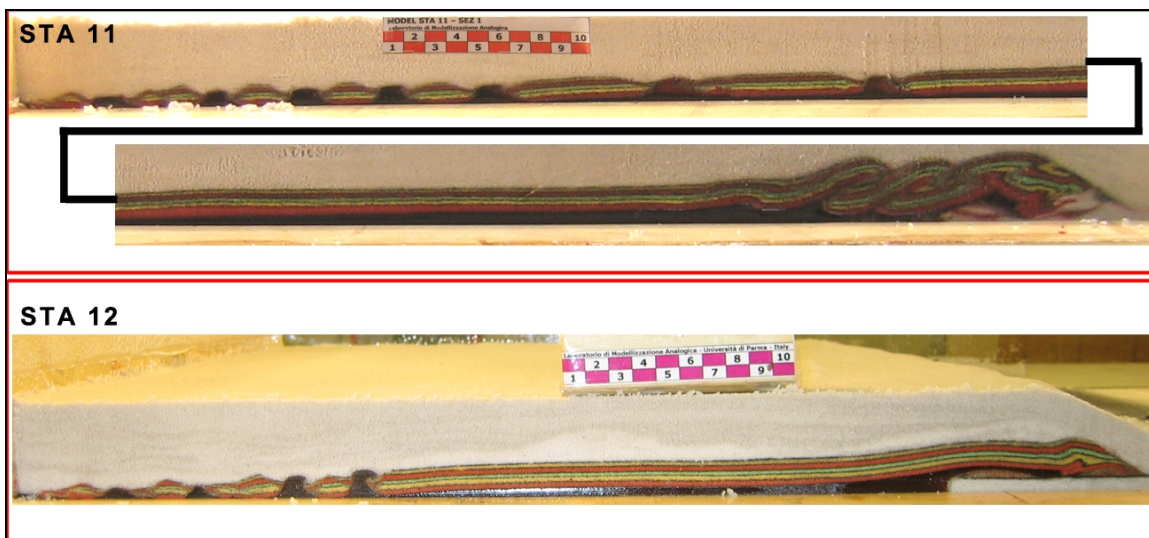


Figura 5.7. Sezione dei modelli STA 11 e 12, in cui si vede l'area non deformata, tra le due parti deformate

Il modello deformato è quindi ripartito in tre aree la cui lunghezza è stata misurata nella parte centrale di ogni modello (Figura 5.8).

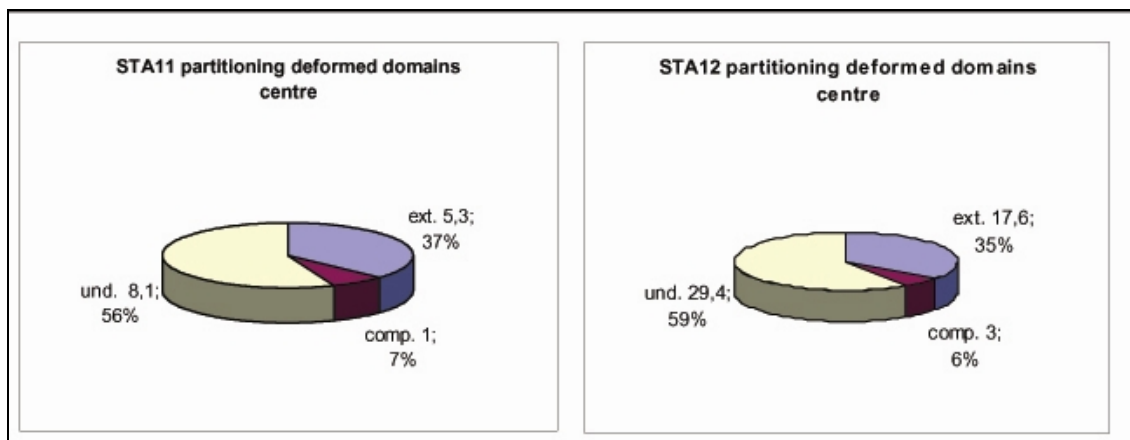


Figura 5.8. Distribuzione percentuale delle aree deformate e non-deformate

### Parte in compressione

Nel modello STA 12 la parte frontale in compressione si è sviluppata con un *overtrusting* della copertura sovrascorsa al livello di silicone che è andato in *pinch out* sul livello di sabbia.

Nel modello STA 11 la compressione si è sviluppata con differenti strutture influenzate dalla posizione lungo la linea del fronte del sistema. Al centro del modello le strutture sono simili a quelle ottenute nel modello STA 12 (Figura 5.9 A), le parti laterali del fronte si presentano con un accorciamento maggiore e si notano delle *box folds* (Figura 5.9 B) e dei *thrusts* (Figura 5.9 C). Questo è dovuto allo sforzo di taglio lungo le pareti maggiore nel modello STA 11 Più lungo. Le parti laterali del modello presentano una compressione maggiore rispetto al centro del modello (Figura 5.10). Una situazione simile, la si può ritrovare anche in natura nella parte settentrionale del Golfo del Messico, in cui *fold-and-thrust belts* si riscontrano nei lati est e ovest del bacino salifero.

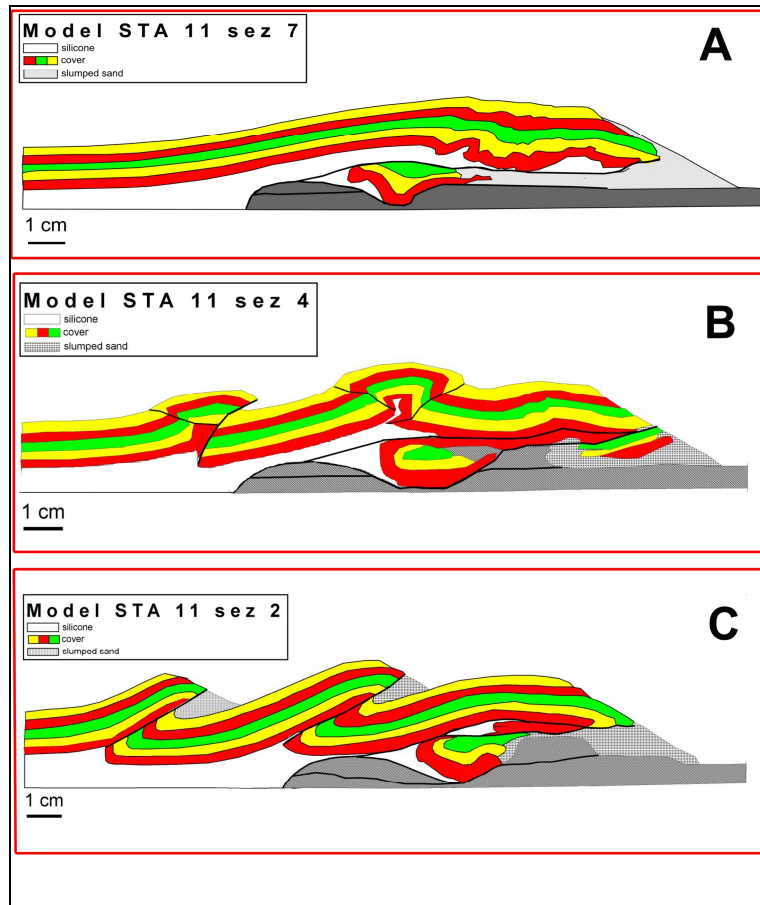


Figura 5.9 Line drawing del modello STA 11

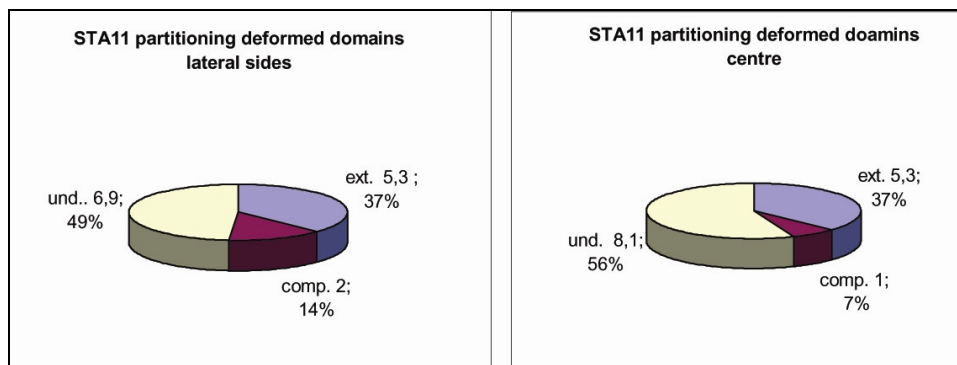


Figura 5.10 Percentuale di deformazione nel mod STA 11 al centro e nei lati

Da un confronto con linee sismiche è possibile notare la somiglianza delle geometrie del sistema naturale (*Mississippi fan fold-belt*) con le sezioni del modello STA 11 (Figura 5.11).

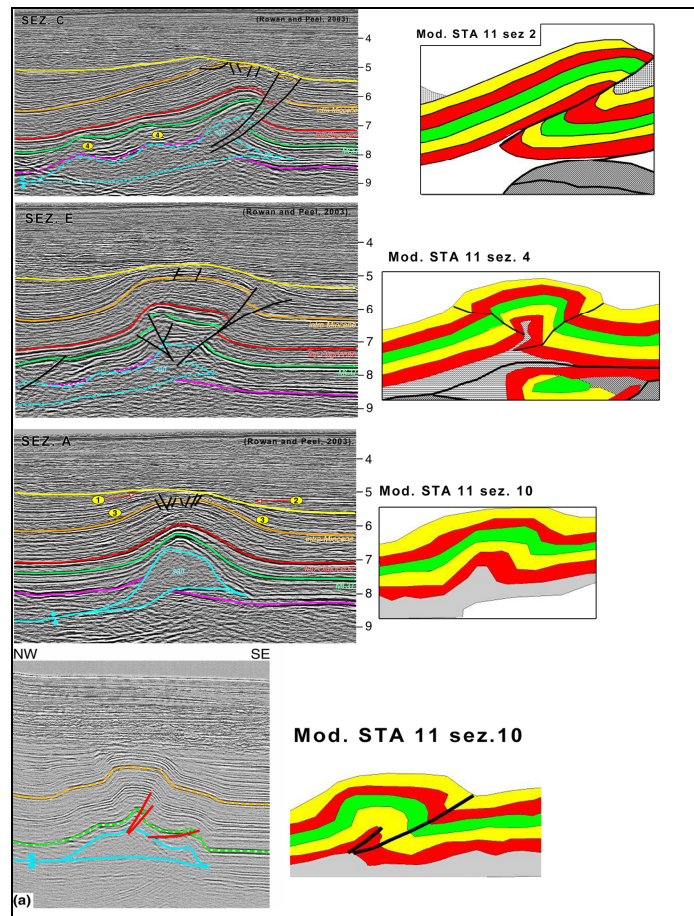


Figura 5.11. Linee sismiche della zona *Mississippi fan fold-belt* e *line drawing* del modello STA 11 (modificato da ROWAN ET AL., 2003)

### 5.1.8 Conclusioni

I modelli presentati erano stati progettati per essere delle riproduzioni molto semplificate di sistemi reali relativi a tettonica *thin-skinned* in margini passivi con sale.

Questa semplicità è stata voluta per introdurre solo un piccolo numero di variabili nei modelli. Questo permette di testare l'influenza di ogni singola variabile sulle strutture che si formano.

Molte altre variabili importanti (es. sedimentazione sintettonica, tettonica di basamento e molte altre non ancora ben descritte in letteratura) agiscono nei sistemi geologici reali, influenzandone la deformazione. I nostri modelli rappresentano dunque una prima approssimazione di analisi dei margini passivi con sale basata sulla modellistica.

**Estensione verso il margine:** la localizzazione, la spaziatura e la cinematica delle strutture deformative dipende se solo lo *spreading* del sale agisce sul sistema (nessuna inclinazione del margine) oppure se vi è anche scivolamento (margine inclinato). In questo secondo caso il sistema deformativo segue una sequenza di propagazione "*back and forth*" convergendo verso il centro. Questo tipo di propagazione era già stato osservato, studiato e descritto in molti cunei orogenici che si scollano sul sale (COSTA ET AL., 2002; COSTA E VENDEVILLE, 2002; COSTA ET AL., 2004). Lo spessore della copertura influenza direttamente l'entità sia dello scivolamento, sia dello *spreading* gravitativo del sottostante livello salino e, di conseguenza, la lunghezza dei blocchi fagliati ed il rigetto lungo le faglie normali. Pertanto, se la copertura è più spessa del sale i blocchi di *hangingwall* possono sprofondare fino alla base del sale anche in assenza di sin sedimentazione sin-tettonica. Questo sprofondamento con formazione di superfici di *welding* tende a fermare il flusso del sale e limita la lunghezza dei blocchi fagliati.

**Compressione al fronte legata all'estensione al margine:** i margini passivi che presentano questo tipo di deformazione sono ripartiti in domini deformativi (estensionali, indeformato e compressivo) la cui lunghezza reciproca è indipendente dall'estensione areale del sistema salino. I modelli che riproducono questi margini mostrano che sia la quantità totale di estensione, sia il tasso di estensione come pure la geometria, l'ampiezza e la distribuzione dei domini deformativi sono direttamente dipendenti:

- 1- dagli spessori sia del sale che della copertura,
- 2- dal rapporto di spessore tra questi,
- 3- dalla pendenza del margine

La compressione si attiva attraverso la formazione di pieghe e *thrusts* là dove il sale si chiude verso il fronte, soprattutto verso le terminazioni laterali del bacino salifero. Queste strutture seguono una sequenza di formazione di tipo *break-back*. L'estensione al margine forma *graben* e *semi graben* e quando si arriva alla formazione di *raft*, la loro lunghezza aumenta verso il bacino. I risultati raggiunti dai semplici esperimenti presentati nel lavoro, forniscono risposte a situazioni semplici, cosicché il rapporto causa-effetto è ben evidenziato ogni

volta. E' importante conoscere questi rapporti basilari quando si devono interpretare strutture che sono ulteriormente complicate da un ampio sistema di variabili come, p. es., inversione tettonica o, più importante ancora, quando si cerca di ricostruire l'originale sviluppo areale del sale, come pure il suo spessore. Una presenza massiva di sale verso il bacino, che è ben visibile in sismica, può essere legato al flusso e aver lasciato ampie superfici di *welding* verso il margine. Il riconoscimento di una situazione di questo tipo può essere di cruciale importanza durante l'esplorazione petrolifera, poiché la migrazione di sale associata alle superfici di *welding* permette agli idrocarburi che si trovano nelle sequenze pre-sale di migrare nelle sequenze soprastanti. La distribuzione areale delle strutture estensionali permette anche di ricostruire l'angolo di inclinazione basale del margine, che può essere cambiato nel tempo a causa della contrazione termica della crosta oceanica e/o dalla risalita tettonica o isostatica del continente (margine del W Africa).

## 5.2 Benchmark test

In occasione del convegno internazionale GEOMOD 2004 svolto a Emmeten (CH) nel giugno 2004, sono stati realizzati tre modelli in compressione i cui risultati sono stati inseriti in un "*Benchmark test*" che ha coinvolto numerosi laboratori di modellistica sparsi nel mondo.

### 5.2.1 Set-up modelli

L'obiettivo di questo *Benchmark test* è stato quello di analizzare i risultati di diversi laboratori mantenendo costanti alcuni parametri costruttivi. Il laboratorio di Parma, ha partecipato con due modelli con le seguenti caratteristiche costruttive:

- Lunghezza: 60 cm
- Larghezza: 33 cm
- Spessore: 3,5 cm

Le uniche differenze dei due modelli sono gli spessori dei livelli *marker* di sabbia. Il modello 1 ha i *marker* spessi 0,5 cm (Figura, 5.12) il modello 2 ha i *marker* spessi 1 cm. (Figura 5.13)

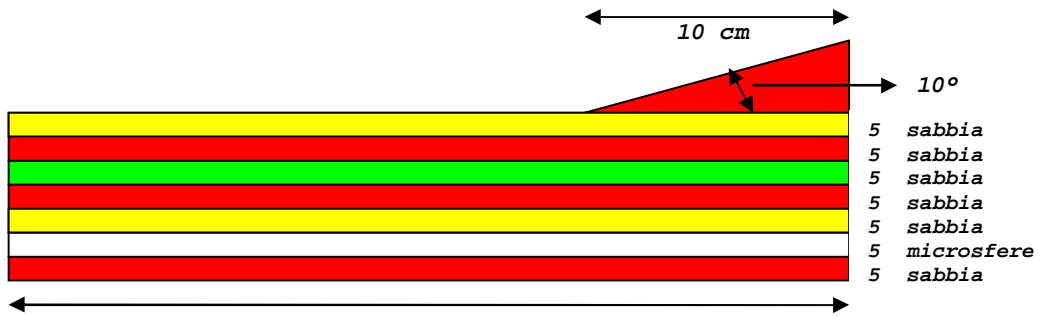


Figura 5.12. Modello 1

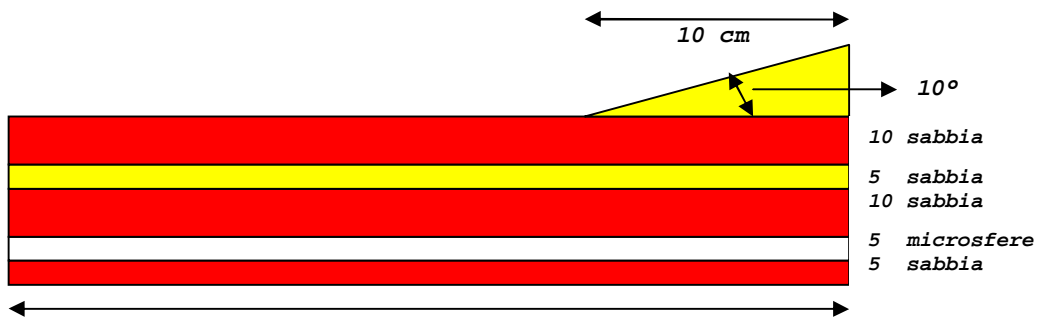


Figura 5.13. Modello 2

Il modello 1 è stato accorciato per un totale di 14 cm pari al 23,5% della lunghezza totale.

Il modello 2 è stato accorciato per un totale di 19 cm pari al 32% della lunghezza totale.

### 5.2.3 Risultati

Nel modello 1 si formano quattro *forethrusts* nella parte frontale ed alcuni *backthrusts* nella parte al retro, nonché due *backthrusts* minori associati al *thrust sheet* più esterno ( Figura 4.14 sezione centrale).



Figura 5.14. Sezione centrale

L'angolo del cuneo varia da  $23^\circ$  tra il primo e il secondo *thrust*, a  $14^\circ$  tra il secondo ed il terzo, fino a  $9^\circ$  tra il terzo ed il quarto.

Nel modello 2 ( **Figura 5.15. Sezione centrale**) si nota una distribuzione dell'accorciamento più regolare e la formazione di un quinto *thrust* nella parte frontale dovuta al maggiore accorciamento di tutto il modello.

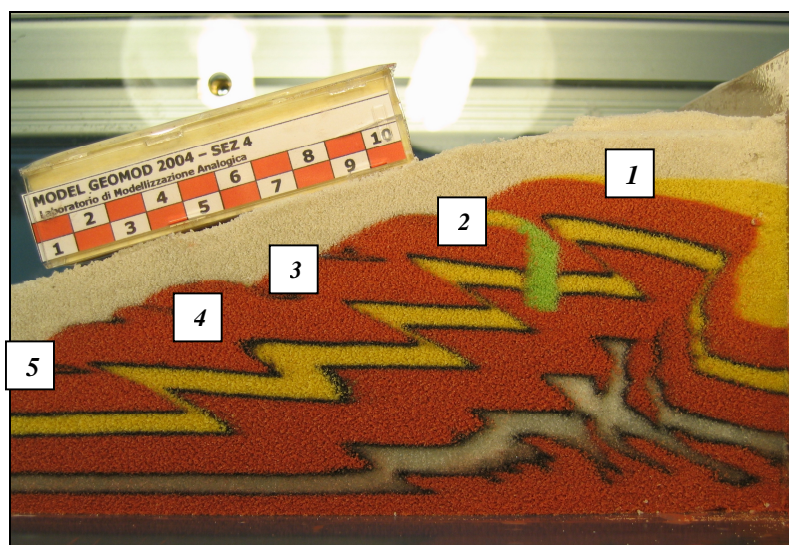


Figura 5.15. Sezione centrale

Durante la deformazione, i *thrusts* neoformati sono stati marcati con una striscia di sabbia colorata distribuita alla superficie del modello (Figura 5.16. Top del modello 2); tale operazione ha permesso di osservare che, nel momento in cui si attivava un nuovo sovrascorrimento, veniva disattivato completamente quello precedente, almeno nella parte superiore del modello.

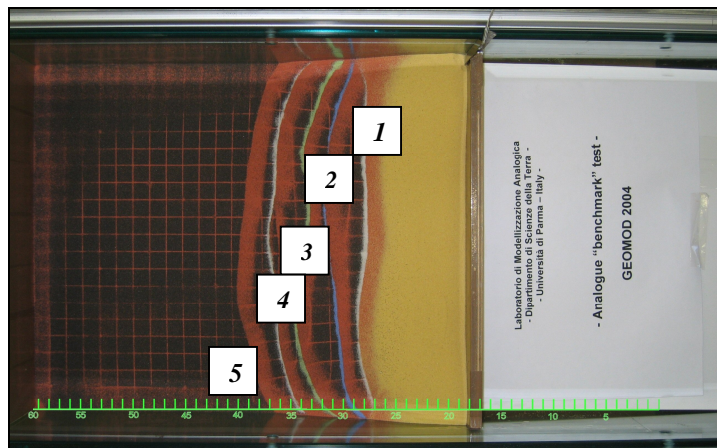


Figura 5.16. Top del modello 2

La ricostruzione del movimento lungo ciascun sovrascorrimento, fatta sulla sezione centrale di ciascun modello alla fine della deformazione, ha evidenziato che nella parte più interna dei modelli i sovrascorrimenti hanno accomodato un accorciamento maggiore. Questo ha probabilmente comportato una loro riattivazione dovuta all'aumento del materiale che si accumula in quest'area al procedere della deformazione. La diminuzione areale nel modello dovuta alla compattazione (proporzionale alla diminuzione volumetrica, poiché la larghezza rimane costante) non è, infatti, sufficiente a compensare la differenza di area esistente tra la parte più superficiale del modello e quella più interna e profonda. Il livello di microsferi sembra dunque separare la parte inferiore dei modelli da quella superiore a diverso grado di accorciamento, assorbendo la deformazione in eccesso; la stessa funzione avrebbe un livello viscoso (i.e., silicone). Questo è particolarmente interessante poiché dimostra che, in un sistema reale, un livello "debole" può disaccoppiare non solo geometricamente e cinematicamente le deformazioni sopra e sottostanti, ma anche quantitativamente.

### Immagine acquisita dal *laser*

La superficie dei modelli è stata acquisita in 4D da un *laser* avente una risoluzione di 0.24 x 1 mm, le scansioni sono state effettuate ogni 2 cm di accorciamento (Figura 5.17 5.18).

La ricostruzione dei cambiamenti che avvengono nel modello durante la deformazione indicano che lo sforzo di taglio lungo le pareti laterali provoca sia l'ispessimento che l'accorciamento del cuneo, con conseguente cambiamento di geometria e inclinazione delle faglie. Le modificazioni provocate dallo sforzo di taglio lungo le pareti si smorzano progressivamente verso il centro del modello, come evidenziato anche dal confronto tra le due sezioni trasversali tagliate al centro del modello ed a 0.5 dalla parete laterale (Figura 5.19 A B), nonché dai profili delle parti laterali e centrale del modello mostrati in Figura 5.20.

Questi risultati dimostrano chiaramente come l'acquisizione delle immagini del modello effettuata attraverso le pareti laterali durante la deformazione e le conseguenti considerazioni tratte da queste immagini siano del tutto inadeguate a descrivere correttamente la geometria e la cinematica di deformazione e portino ad interpretazioni errate. Nel caso, poi, che i modelli abbiano un alto rapporto ( $> 0,5$ ) tra entità di raccorciamento e larghezza del modello stesso, la deformazione dovuta al taglio lungo le pareti laterali arriva ad interessare anche la parte centrale del modello, che dunque non ha più nessuna somiglianza con il sistema reale riprodotto.

L'*analogue benchmark test*, organizzato durante il convegno Geomod 2004, ha purtroppo evidenziato come molti laboratori utilizzino le tecniche sopra stigmatizzate, gettando seri dubbi sui risultati ottenuti.

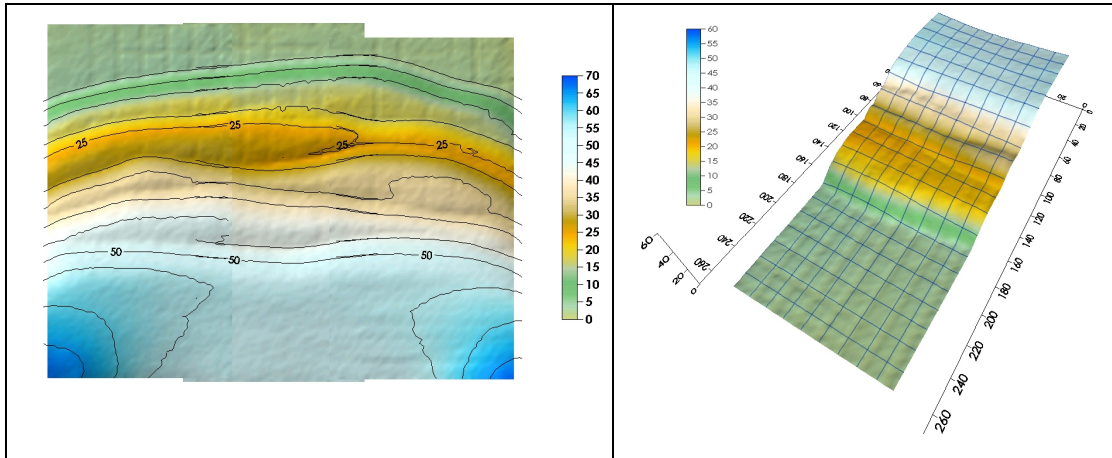


Figura 5.17 Top del modello 2

Figura 5.18 3D del modello 1

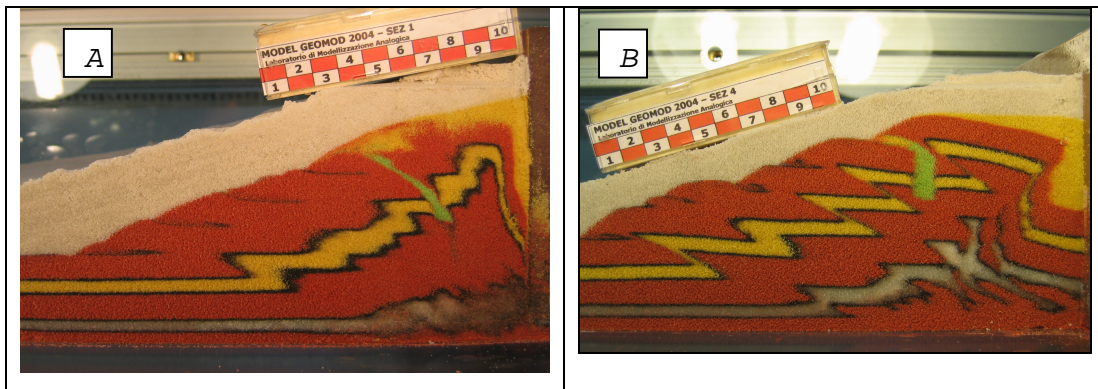


Figura 5.19 Confronto sezione a 0,5 cm. dalla parete (A) e sezione centrale (B)

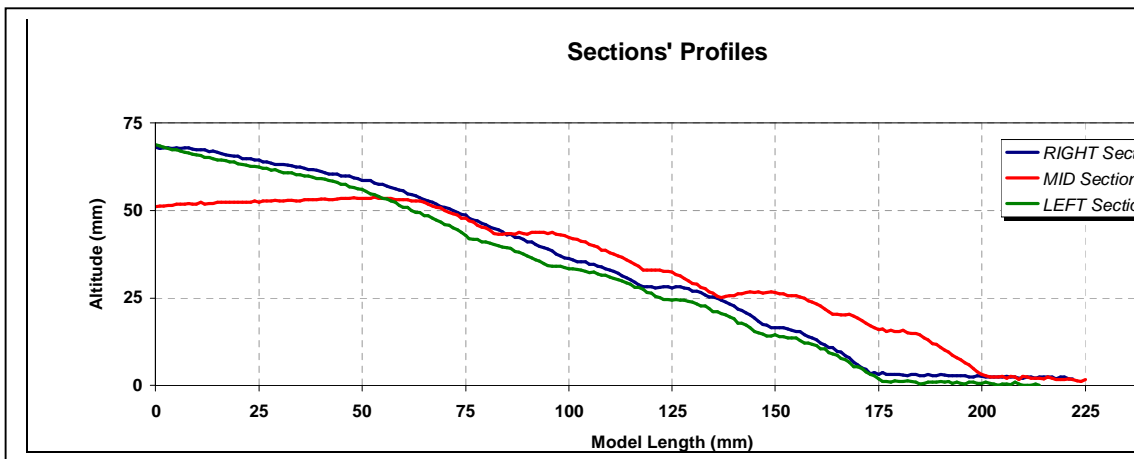


Figura 5.20 Profili modello 2

## 5.3 Modelli bacino salifero kunguriano

### 5.3.1 Introduzione

Durante l'ultimo anno di dottorato sono stati realizzati dei modelli analogici riguardanti un bacino con presenza di sale di età kunguriana. I modelli, in tutto 5, sono stati progettati e realizzati partendo da pochissimi dati, ricavati da una sola linea sismica. La carenza di dati bibliografici di base e la conseguente carenza di conoscenze geologiche dell'area, ha fortemente influenzato la progettazione dei modelli. Per questo motivo si è scelto di modellizzare il sistema a diversi intervalli temporali, in modo tale da avere modelli semplici per poter analizzare con precisione poche variabili alla volta.

### 5.3.2 Area di studio

L'area di studio che è stata analizzata su richiesta di ENI, rappresenta la parte meridionale di un bacino con un livello di sale kunguriano, tale bacino è stato interessato da varie fasi estensionali e compressive, succedutesi a partire dal Devoniano fino ai giorni nostri. Il bacino è il risultato dell'orogenesi ercinica ascrivibile al periodo Devoniano (350-417 M.a.) e presenta un sistema di piattaforme carbonifero-devoniane allungate in direzione W-E che fronteggiano una catena meridionale con andamento SO-NE (Figura 5.21).



Figura 5.21 Area di studio

Dall'interpretazione della linea sismica (Figura 5.22) è possibile delineare 4 aree con le seguenti caratteristiche:

- 1- Area a SSW ( Figura 5.23 A ) in cui la successione sopra la discordanza cimmerica non è interessata da strutture deformative importanti.
- 2- Area a SSW (Figura 5.23 B) Le faglie che interessano i livelli pre-discordanza mostrano prevalente estensione nel settore sud-occidentale e compressione netta in quello più nord-orientale. Questo può dipendere dal sovrapporsi degli effetti contrastanti della estensione permo-triassica a quelli della collisione ercinica, ulteriormente complicati dalla successiva collisione cimmerica. Tuttavia, la parte centrale di questo settore SW, che appare notevolmente rialzata ed erosa mettendo a contatto terreni carboniferi e giurassici, potrebbe anche rappresentare un mega *pop-up*, vale a dire una struttura simmetrica, indizio di una catena a doppia vergenza.
- 3- Area centrale in profondità (Figura 5.23 C). Gli orizzonti pre-sale mostrano una tettonica compressiva i cui *thrusts* sembrano convergere in profondità verso un livello di scollamento preferenziale non meglio identificato. Questi *thrusts* terminano con strutture simmetriche.
- 4- Area centrale e settentrionale (Figura 5.23 D). Vi sono molte faglie normali negli orizzonti post-sale, con rigetti che aumentano nel settore di NE, dove sembrano più precoci, come dimostrerebbe la discordanza angolare tra i riflettori permo-triassici e quelli giurassici. Dato che si trovano unicamente sopra il sale, queste faglie non sembrano registrare, almeno in quest'area, un'estensione crostale, ma piuttosto una blanda estensione gravitativa, probabilmente legata all'approfondirsi del bacino. Questa estensione (Permo-Triassica) avrebbe innescato anche la risalita diapirica, in seguito incrementata dalla sedimentazione differenziale nei bacini minori che bordano i diapiri.

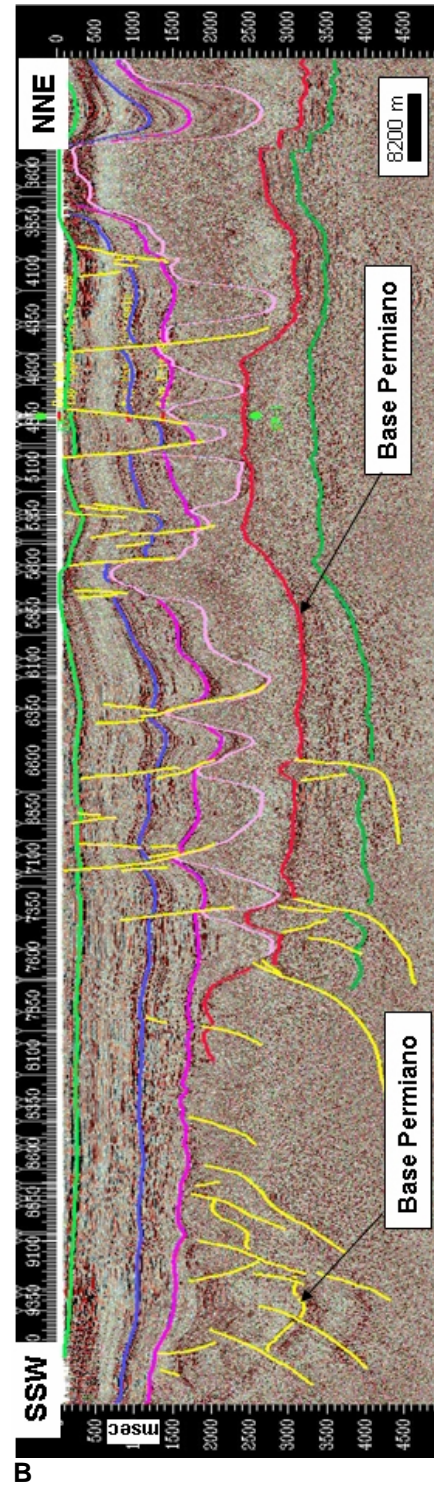
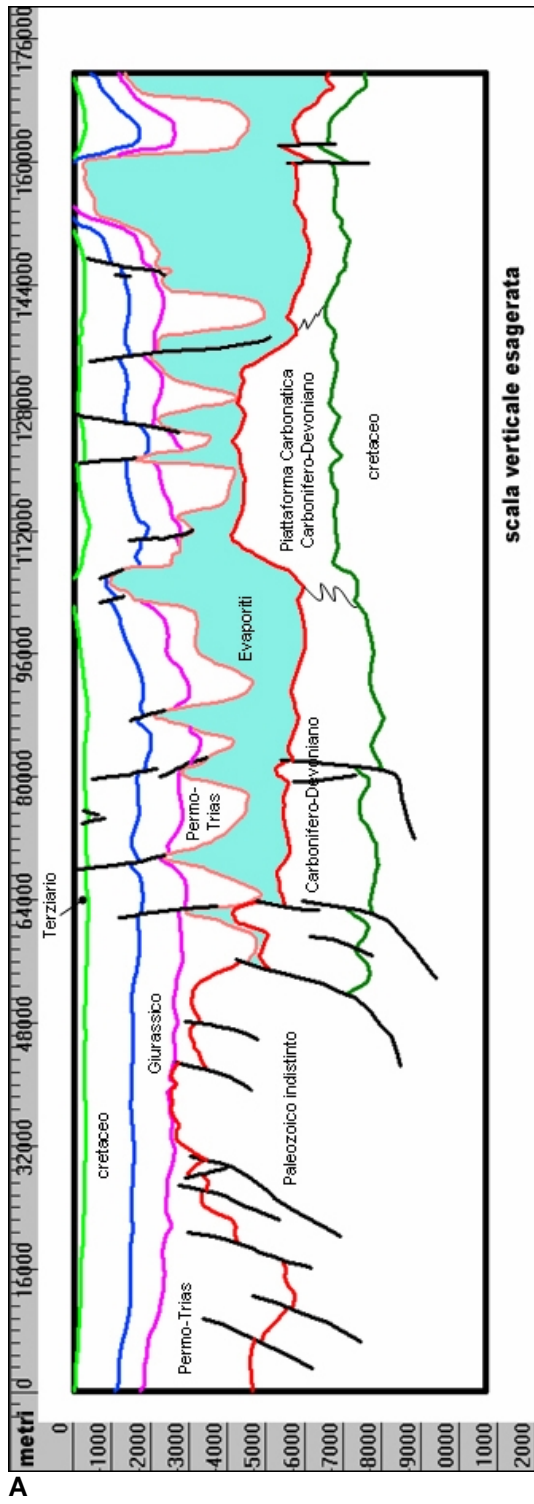


Figura 5.22 A- Line drawing e B-linea sismica della parte centrale del bacino (linea verde della Figura 5.17), in azzurro sono evidenziate le evaporiti

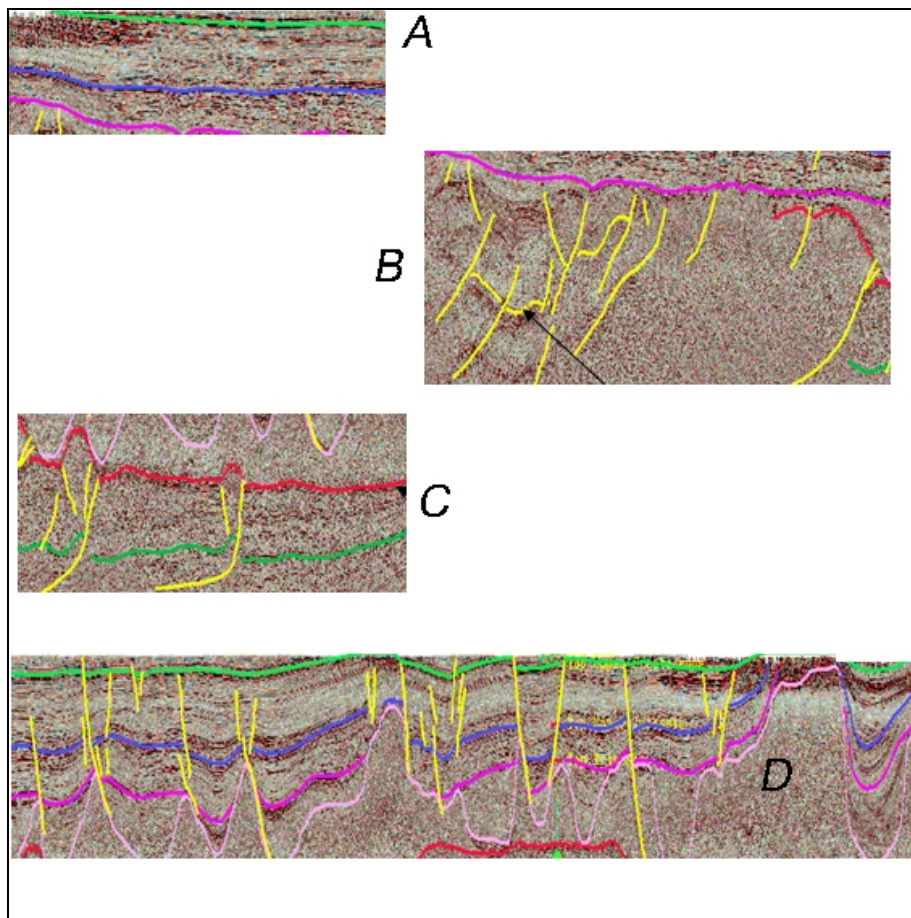


Figura 5.23 Dettagli della linea sismica

### 5.3.3 Problemi dell'area

L'impossibilità di ripartire la deformazione finita nelle varie fasi che si sono susseguite nell'area, i.e. compressione ercinica, estensione permo-triassica, compressione cimmerica e successiva erosione, non permette di dare risposte univoche ad alcuni problemi importanti.

- Ø Qual era il limite meridionale del bacino salifero kunguriano?
- Ø Le sequenze permo-triassiche erano presenti nell'attuale area di catena ed eventualmente con quale spessore?
- Ø I bacini permo-triassici nell'area di retro-catena quando e come si sono formati?
- Ø Le piattaforme carbonatiche sono state interessate, anche se limitatamente dalla compressione?

- Ø In caso affermativo questo è avvenuto durante la fase ercinica o la successiva fase cimmerica?
- Ø A quale entità di accorciamento i margini interno ed esterno della piattaforma arrivano ad essere implicati rispettivamente nella compressione?
- Ø Quali caratteristiche meccaniche e reologiche deve avere lo scollamento basale paleozoico affinché il margine esterno della piattaforma venga eventualmente coinvolto nella deformazione?

#### 5.3.4 Set-up modelli

Sulla base dei quesiti proposti sono stati realizzati complessivamente 5 modelli con caratteristiche riassunte in tab 5.4. In tutti i modelli, il sale è stato riprodotto con gel di silicone, le altre rocce sedimentarie con sabbia quarzosa anidra, mentre orizzonti particolarmente deboli sono stati riprodotti con microsfere di vetro. Tutti i modelli sono stati ridotti di un fattore di scala di  $3 \times 10^{-6}$  così da riprodurre il sistema geodinamico nella sua interezza. Questo ha permesso di:

- a) riprodurre il più fedelmente possibile le condizioni al contorno del prototipo reale;
- b) riprodurre correttamente non solo le geometrie ma anche la cinematica del sistema;
- c) minimizzare gli effetti di bordo.

Modello	Caratteristiche	Lungh. (mm)	Largh. (mm)	Spessore (mm)	Def. Totale (mm)	Tempo di deformazione
1	Compressione	400	400	14	120	70 min
2	Compressione	400	400	14	120	435 min
3	Estensione	550	400	13	130	24 ore
4	Estensione + sedimentazione	450	500	18	70	20 ore
5	Compressione + estensione + sedimentazione	455	400	18	120 compress. 90 estensione 30 compress.	7 ore compr. 18 ore est. 9 ore compr.

Tab 5.4 Caratteristi del set di modelli

### 5.3.5 Obiettivi dei modelli

I modelli sono stati progettati per riprodurre il sistema reale a diversi intervalli temporali.

#### MODELLO 1 e 2

TEMPO – Riproduce il sistema geodinamico al tempo pre-sale ed evidenzia solo la fase compressiva ercinica.

SCOPO – Sono progettati per individuare se ed eventualmente a quale entità di accorciamento totale la piattaforma carbonatica avrebbe potuto essere interessata da deformazione compressiva ai suoi margini meridionale e settentrionale in funzione delle proprietà meccaniche dello scollamento basale..

CARATTERISTICHE - Sono identici tra loro, con l'unica esclusione dello scollamento basale:

- frizionale debole nel modello 1 (microsfere di vetro)
- viscoso nel modello 2 (gel di silicone)

#### MODELLO 3

TEMPO – Riproduce il sistema geodinamico al tempo pre-collisione cimmerica. Prende in esame la fase estensionale permo-triassica e la conseguente risalita diapirica.

SCOPO - Si è testata l'influenza della blanda tettonica estensionale-gravitativa (*thin-skinned*) sullo sviluppo dei diapiri e sulla loro localizzazione in rapporto alla piattaforma carbonatica.

CARATTERISTICHE – Si è partiti dall'assunto che il diapirismo si sia innescato precocemente e sia evoluto contemporaneamente per estensione attiva e *downbuilding* legato a sedimentazione sin-cinematica. La base del modello coincide con la base del sale, eccetto che per il settore di catena, che è stato riprodotto come settore-limite del bacino salifero, e per quello della piattaforma, che è stata riprodotta alla base del silicone. Queste parti sono state riprodotte nel modello poiché si ritiene abbiano avuto un ruolo meccanicamente importante nello sviluppo delle strutture formatesi durante l'estensione.

Quest'ultima è stata ottenuta attraverso il flusso del silicone per scivolamento gravitativo (il modello è stato inclinato di 2°).

#### *MODELLO 4*

**TEMPO** - Riproduce il sistema geodinamico nel periodo di tempo compreso tra l'inizio dell'estensione permo-triassica e l'attuale. Prende in esame la fase estensionale permo-triassica, nonché la successiva crescita diapirica per *downbuilding*.

**OBIETTIVI** - Si è testata la reciproca influenza della estensione gravitativa e del carico sedimentario differenziale sulla crescita diapirica. Il confronto tra i risultati del modello e l'immagine sismica permette di valutare similitudini e differenze e risalire alle loro cause in rapporto agli eventi naturali e a quelli riprodotti.

**CARATTERISTICHE** – Si è assunto che l'estensione sia tardo triassica e che la collisione cimmerica non abbia causato deformazioni apprezzabili nell'area esaminata: questo ci permetterà di valutare le differenze rispetto al modello 5, in cui tutte le fasi tettoniche sono state riprodotte. Come per il modello 3, anche in questo caso la base del modello è stata fatta coincidere con la base del sale, eccetto che per il settore più meridionale e per quello della piattaforma. A differenza di quanto è avvenuto nel modello 3, in questo modello l'estensione gravitativa è stata innescata dopo la sedimentazione permo-triassica, mentre la fase di crescita passiva dei diapiri e dei *walls* è stata ottenuta con la riproduzione della sedimentazione giurassico-attuale.

#### *MODELLO 5*

**TEMPO** - Riproduce il sistema geodinamico durante tutta la sua evoluzione tettono-sedimentaria.

**OBIETTIVI** – Confrontare similitudini e differenze tra le sezioni del modello e la sezione sismica ed analizzarle sulla base dei risultati dei modelli precedenti. Questi ultimi, riproducendo una ad una le varie fasi tettono-sedimentarie, hanno permesso di legare i risultati ad esse imputabili tramite rapporti causali.

**CARATTERISTICHE** – Riproduce la fase compressiva ercinica, la successiva fase estensionale permo-triassica, nonché la più recente fase compressiva

cimmerica. Nel modello sono stati riprodotti anche lo *hiatus* che marca la discordanza cimmerica e la successiva crescita diapirica per *downbuilding*. Assembla le caratteristiche costruttive dei modelli 2 e 4.

L'accorciamento dovuto alla compressione ercinica è stato del 23,75%. Nel bacino di *foredeep* sono stati poi depositi il silicone e la copertura permo-triassica. La successiva estensione ha indotto un allungamento del 28%, valutato rispetto alla lunghezza iniziale della sezione avente alla base il silicone. La successiva compressione cimmerica ha provocato un accorciamento del 12%. E' stata poi effettuata un'erosione nella zona di catena, seguita dalla sedimentazione giurassico-attuale, con ulteriore crescita dei diapiri formati e cresciuti nelle fasi precedenti.

### 5.3.6 Risultati

#### Modello 1

Se il sistema si scolla lungo un orizzonte di tipo frizionale, (Figura 5.24) la deformazione interessa solo il margine interno della piattaforma, che prima si compatta e poi inizia ad essere implicato quando il sistema ha subito un accorciamento di circa il 18,75%.

A fine deformazione (29,5%) la catena arriva a ridosso della piattaforma, la quale influenza l'avanzamento dei *thrusts*.

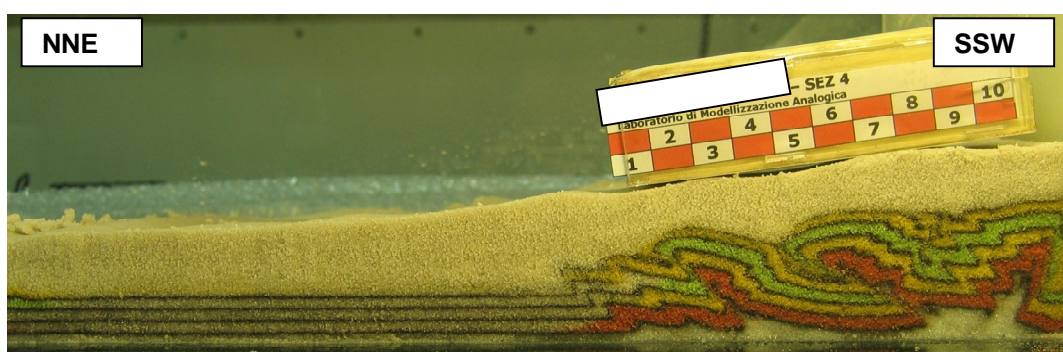


Figura 5.24 Fotografia della sezione centrale del modello 1

#### Modello 2

Se il sistema si scolla lungo un orizzonte di tipo viscoso, (Figura 5.25) quindi molto più debole, la deformazione interessa solo il settore esterno

(settentrionale) alla piattaforma quando il sistema ha subito un accorciamento di circa il 19%.

Il margine interno (meridionale) della piattaforma non viene deformato ma solo compattato mentre la piattaforma viene by-passata dalla deformazione e traslata passivamente verso nord di circa 5 km (pari a 1,5 cm nel modello).

La presenza della piattaforma influenza comunque in modo sostanziale la propagazione dei *thrusts*.

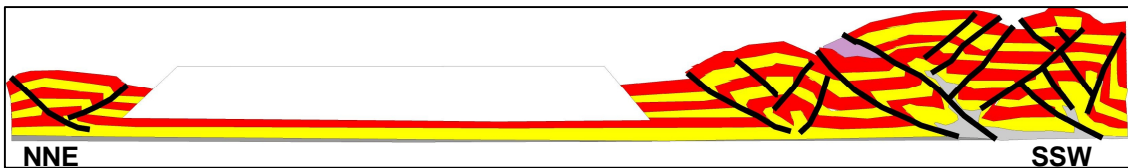


Figura 5.25 Line drawing della sezione centrale del modello 2

### Modello 3

In questo modello le strutture estensionali si sono sviluppate contemporaneamente sia al fronte che al retro, per convergere nel tempo verso il centro (Figura 5.26). Le differenze riscontrabili tra la sezione centrale del modello e la sezione sismica possono dipendere da vari fattori.

- 1- L'estensione potrebbe essere avvenuta alla fine del Trias, interessando un pacco sedimentario di spessore costante.
- 2- Sulla base dell'unica linea sismica di riferimento si è supposto che l'estensione fosse verso il bacino, cioè a NE, ma questo può non essere del tutto corretto, in quanto il bacino poteva approfondirsi verso NW e di conseguenza l'estensione gravitativa svilupparsi verso quest'ultima direzione, cioè quasi perpendicolarmente alla sezione.



Figura 5.26 Fotografia della sezione centrale del modello 3

#### Modello 4

Alcune sequenze sin-cinematiche sono presenti solo nella zona interna alla piattaforma e sopra ai diapiri, dove formano blande antiformi e sinformi, *onlap*, troncature, assottigliamenti alternati ad ispessimenti sopra i diapiri. (Figura 5.27)



Figura 5.27 Fotografia della sezione centrale del modello 4

Questo dimostra che i diapiri hanno avuto varie fasi di inversione con crescita e *withdrawal* alternate, legate alle variazioni di flusso del sale verso destra (nord), presumibilmente dovute all'effetto di ostacolo della piattaforma. In questo modello le strutture legate all'estensione gravitativa si sono formate attraverso *graben* e *semigraben* bordati da faglie normali che hanno causato l'assottigliamento delle sequenze pre-cinematiche ed il conseguente innesco dei diapiri in fase di crescita reattiva. (Figura 5.28)

La successiva crescita dei diapiri sembra invece attuata principalmente attraverso ampie sinclinali successivamente invertite in blande anticlinali direttamente soprastanti i diapiri.

Questa strutturazione, marcata dall'andamento delle sequenze sedimentarie giurassico-attuali, può essere spiegata ipotizzando che il flusso *downdip* del silicone abbia avuto fasi di accelerazione e decelerazione dipendenti dal variare del suo spessore nel tempo e dall'effetto ostacolo dovuto al rilievo basale formato dalla piattaforma. Questo avrebbe causato una blanda compressione, invertendo per un breve intervallo, le strutture estensionali.

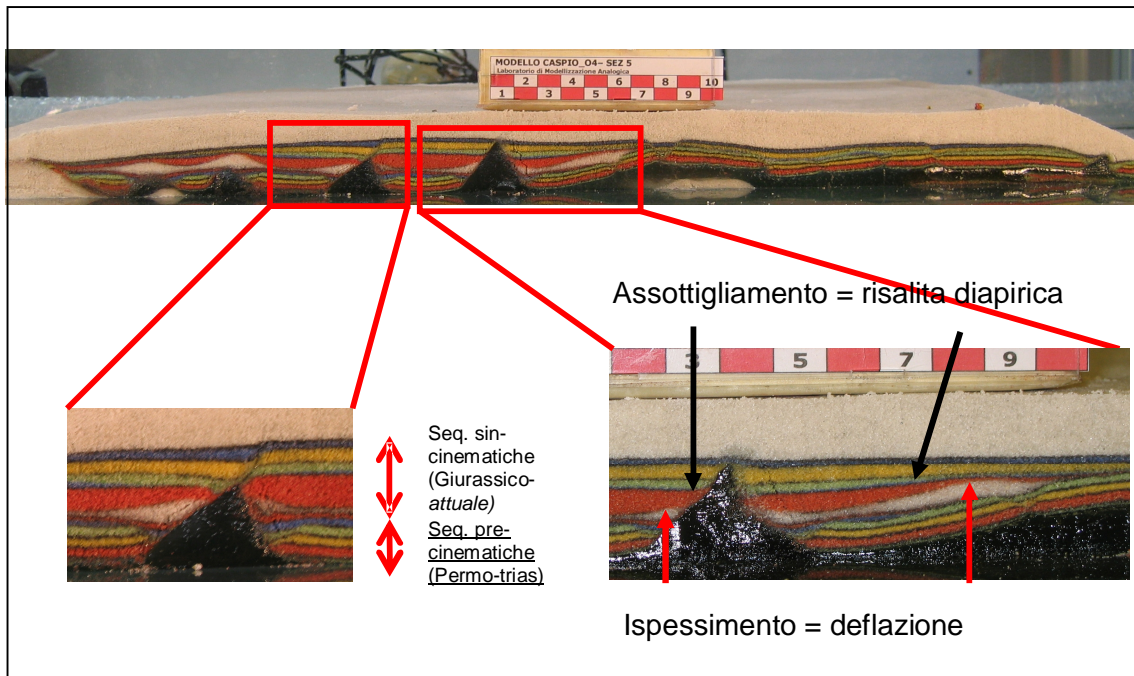


Figura 5.28 Assottigliamenti e ispessimenti del modello 4

### Modello 5

In questo modello le variabili che influenzano il sistema sono molte e cambiano nel tempo. Non è quindi possibile stabilire sicuri rapporti causali tra ciascuna variabile ed i fenomeni e/o le strutture osservabili nella deformazione finita (Figure 5.29, 5.30). In questo caso, come per tutti i modelli complessi, sono piuttosto le differenze e le similitudini riscontrabili tra il modello e la sismica di riferimento a permettere alcune considerazioni.



Figura 5.29 Fotografia della sezione centrale del modello 5

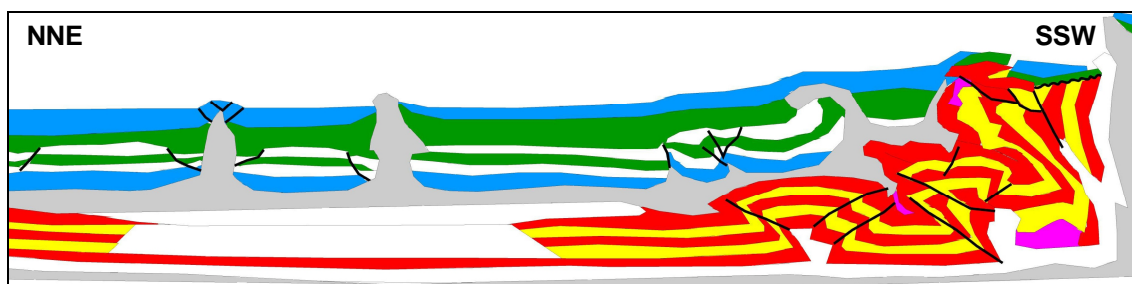


Figura 5.30 Line drawing della sezione centrale del modello 5

### *Similitudini*

Lo spessore delle sequenze permo-triassiche nei *mini-basins* è costante e non vi è discordanza angolare tra queste sequenze e quelle post-cimmeriche.

Questo può significare che l'estensione è iniziata dopo che le sequenze permo-triassiche erano già in gran parte deposte e non si è verificata rotazione dei *mini-basins* (faglie di crescita o deflazione del sale).

La compressione non ha interessato la piattaforma, che è stata invece trasportata passivamente verso l'esterno (nord).

Questo può indicare che anche in natura lo scollamento basale nelle sequenze sotto il sale è molto debole, forse a comportamento viscoso.

### *Differenze*

La forma della parte dei diapiri che attraversa le sequenze post-cimmeriche è diversa: sub-cilindrica o con brevi *overhangs* laterali nel modello, sub-triangolare sull'*imaging* sismico.

Questo indicherebbe che il meccanismo di risalita diapirica attraverso le sequenze post-cimmeriche non è stato di tipo passivo, come riprodotto nel modello, ma di tipo reattivo e/o attivo, forse dovuto al protrarsi dell'estensione gravitativa che potrebbe essere legata a flusso di sale verso le parti più profonde del bacino, dove probabilmente si è verificato anche un diapirismo passivo. La mancanza di espandimenti laterali al top delle sequenze permo-triassiche nei diapiri visibili sulla linea sismica dimostra anche che questi non sono emersi neppure durante la fase cimmerica, come invece è avvenuto nel modello. I diapiri visibili in sismica non sono stati invertiti dalla compressione, come è avvenuto invece nel modello per quei diapiri più prossimi al fronte della catena. Questo dimostra che la compressione cimmerica è stata più blanda, in

quest'area, di quanto riprodotto nel modello. La deformazione finita nel modello mostra un accorciamento netto più marcato di quello ricostruito nella sezione sismica. Questo dato è difficile da interpretare poiché non è possibile quantificare lo *hiatus* marcato dalla discordanza cimmerica nel sistema naturale. Le altre differenze genericamente riscontrabili tra le sezioni del modello e l'immagine sismica di riferimento dipendono dal fatto che gli accorciamenti e l'estensione imposti al modello sono stati quantitativamente arbitrari, data l'assoluta mancanza di dati in proposito.

### 5.3.7 Conclusioni

**La piattaforma è stata trasportata passivamente verso l'esterno (NE) durante la fase ercinica.**

I *thrusts* che interessano il settore esterno alla piattaforma si sono formati come *splays* di uno scollamento basale molto debole (evaporiti o peliti in sovrappressione di fluidi), mentre il margine interno della piattaforma è stato probabilmente compattato.

Non è possibile stabilire dov'era ubicato il limite meridionale del bacino salifero kunguriano.

**La compressione cimmerica non sembra aver interessato il settore in cui si ha presenza di sale, il quale sarebbe stato utilizzato come scollamento basale. Inoltre nessun diapiro sembra essere stato invertito in compressione.**

Nella zona di catena, invece, non è possibile ripartire gli effetti delle varie fasi succedutesi nel tempo né da un punto di vista qualitativo né, tanto meno, quantitativo.

Per quanto riguarda la zona di catena si possono prospettare due scenari alternativi che portano a ricostruzioni evolutive molto diverse tra loro, ciascuna con implicazioni sul sistema petrolifero.

A. La catena attuale si è in gran parte strutturata nella fase ercinica.

In questo caso le sequenze permo-triassiche sarebbero state assenti o molto ridotte in zona di catena.

B. La catena attuale si è in gran parte strutturata nella fase cimmerica.

In questo caso le sequenze permo-triassiche potevano avere un certo spessore anche all'apice della catena attuale.

A loro volta i bacini permo-triassici nella zona di retro-catena possono derivare da fenomeni diversi:

estensione crostale permo-triassica, la quale sarebbe tuttavia limitata a quest'area, come dimostra la mancanza di strutture estensionali nelle sequenze sotto il sale; estensione legata al riequilibrio della catena ercinica e/o cimmerica; catena ercinica e/o cimmerica a doppia vergenza (simmetriche).

**L'estensione che interessa la successione post-cimmerica sopra il sale è di tipo gravitativo (*thin-skinned*) in quanto non interessa le stesse sequenze presenti in catena.**

E' probabile che anche l'estensione tardo-triassica sia stata di tipo gravitativo, almeno in quest'area. Infatti un'estensione crostale (*thick-skinned*) avrebbe interessato anche le sequenze sotto il sale.

L'estensione gravitativa potrebbe essere legata a flusso di sale verso le parti più profonde del bacino, dove probabilmente si ha anche diapirismo passivo.

Lo spessore delle sequenze permo-triassiche nei mini-basins rimane circa costante. Gran parte dei diapiri, inoltre, mantiene una forma sub-triangolare mentre i *mini-basins* mostrano riflettori tagliati dai diapiri stessi e solo raramente festonati, come avviene quando la loro crescita è di tipo passivo.

**Questo indicherebbe che l'estensione sia iniziata quando la successione permo-triassica era già deposta e sia proseguita anche in tempi più recenti oppure che i diapiri abbiano continuato la loro crescita attraverso la successione giurassico-attuale con un meccanismo di risalita attiva.**

## RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questi tre anni di dottorato vorrei ringraziare sentitamente la Prof. ssa Elisabetta Costa per la fiducia che mi ha dimostrato e la sua ampia disponibilità durante tutto il dottorato; credo di essere stato uno studente “fortunato”, in quanto è riuscita a coordinare in modo magnifico il progetto di ricerca.

Ringrazio per la grande collaborazione tecnica dimostrata, Alberto Bazzini, l'Ing. Matteo Vettori e l'Ing. Alessio Bonomini.

Un ringraziamento va anche al Dott. Nicolò Doglioni, con cui ho condiviso la passione per la modellistica.

Ringrazio, inoltre, Alessandro, Davide, Giulio, Sergio e Umberto per tutto...

Un pensiero speciale lo dedico ad Eleonora, che mi è stata vicina nei tre anni di dottorato, sopportando il mio “spigoloso” carattere; una persona speciale con cui condividerò la mia vita.....

Un ringraziamento particolare va anche al Prof. Ceruti, per le piacevoli chiacchierate scientifiche e per il suo straordinario interesse per il mio lavoro.

Non posso, poi non ricordare e ringraziare nonno Emilio, Graziella, Vincenzo, Cristina, Mirco e Giulia

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AA. VV., 1991. *Evaporites, petroleum, and mineral resources*. Elsevier, Amsterdam.

Barr D. 1992. Passive continental margin subsidence. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 149, pp. 803-804.

Bird, P., and K. Piper, 1980. Plane-stress finite-element models of tectonic flow in southern California, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 21, 158-175.

Bosellini A., Mutti E., Ricci Lucchi F. 1989. *Rocce e successioni sedimentarie*. UTET, Torino.

Bridgman, P. W., 1931. "Dimensional Analysis." *Yale Univ. Press.*, New Haven, Conn.

Brune, J.N., and M.A. Ellis, 1997. Structural features in a brittle-ductile wax model of continental extension, *Nature*, 387, 67-70.

Bucky, B.P., 1931. The use of models for the study of mining problems. *Technical Publication, American Institute of Mining Engineers*, 425.

Buckingham, E., 1914. "On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations." *Phys. Rev.*, 4, p. 345-376.

Barton, D.C., 1933. Mechanics of formation of salt domes with special reference to Gulf Coast salt domes of Texas and Louisiana, *American Assoc. Of Petroleum Geol. Bulletin*, Vol. 17, 1025 -1083.

Byerlee, J., 1978. "Friction of Rocks." *Pure Appl. Geophys.*, n. 116, 615-626.

Cadell, H.M., 1889. Experimental researches in mountain building. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1, 339-343.

Carter, N.L. and Hansen, F.D., 1983. "Creep of rock salt." *Tectonophysics*, 92, 275-333.

Cohen, H.A. and Hardy, S., 1996, Numerical modelling of stratal architectures resulting from differential loading of a mobile substrate. *From Alsop, G.I., Blundell, D.J. and Davison I. (eds.), Salt Tectonics*, Geological Society Spec. Publ. n° 100,

265-273.

Cobbold, P.R., and M.P.A. Jackson, 1992 Gum rosin (colophony); a suitable material for thermomechanical modelling of the lithosphere, *Tectonophysics*, 210, 255-271.

Cobbold, P.R., Durand, S., Mourgues, R. 2001. Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments. *Tectonophysics*, 334: 245-258.

Costa E. & Vendeville B.C. 2002 – Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement. *Journal of Structural Geology*, 24, 1729-1739.

Costa, E., Mosconi A., Cavozi C., 2002, Fold and thrust belt on salt: Kinematics and 3D geometry of thrust fronts in natural setting and in physical models. *Bollettino di Geofisica* Vol. 42 n1/2 suppl. pp 162-166.

Costa, E., Camerlenghi, A., Polonia, A., Cooper, C., Fabretti, P., Mosconi, A., Murelli, P., Sormani, L., and Wardell, N., 2004, Modelling salt tectonics in the Mediterranean Ridge Accretionary Wedge. *Geol.Soc.Am.Bull.*, 116 (7/8), 880-894.

Daubre, A., 1879. *Etudes synthétiques de géologie expérimentale*, Dunod, Paris.

Davis, D.M.; Engelder T., 1985. "The Role of Salt in Fold-and- Thrust Belts." *Tectonophysics*, 119, p. 67-88.

Demercian, S., P. Szatmari, and P. R. Cobbold, P.R., 1993, Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basins, offshore Brazil, *Tectonophysics*, v. 228, p. 393-433.

Diegel, F.A., Schuster, D.C., Karlo, J.F., Schoup, R.C., and Tauvers, P.R., 1995, Cenozoic structural evolution and tectonostratigraphic framework of the northern Gulf Coast continental margin, in Jackson, M.P.A., et al., eds., Salt tectonics: A global perspective: *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 65, p. 109–151.

Dixon, J.M., 1974. A new method of determining finite strain in models of geological structures, *Tectonophysics*, 24, 99-114.

Dixon, J.M., and J.M. Summers, 1985 Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes; equipment, model construction techniques and rheology of model materials, *Journal of Structural Geology*, 7, 83-102.

Duval, B., Cramez, C. and Jackson, M.P.A., 1992. "Raft tectonics in the Kwanza basin." *Mar. Petr. Geol.*, 9(4): 389-404.

England, P., and D. McKenzie, 1982 thin viscous sheet model for continental deformation, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 70, 295-321,.

Favre, A., 1878. Archives des Sciences Physique et Naturelles,, No. 246.

Hansen, F.D, and Carter, N.L., 1984. "Creep of Avery Island Rocksalt." In: R.H. Hardy Jr.

Hoshimo, K., et al., 1972. "Mechanical Properties of Japanese Tertiary Rocks under High Confining Pressures." *Geol. Surv. Jpn., Kawasaki, Rep.*, 200-244.

Houseman, G.A., and P.C. England, 1986. Finite strain calculations of continental deformation; 1, Method and general results for convergent zones, JGR. *Journal of Geophysical Research*, 91, 3651-3663.

Hubbert, M. K., 1937. "Theory of scale models as applied to the study of geologic structures." *Geol. Soc. Am. Bull.*, 48, 1459-ff.

Hubbert, M. K., 1945. "Strength of the Earth." *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 29, 1630-1653.

Hubbert, M. K., 1951. "Mechanical basis for certain familiar geologic structures." *Geol. Soc. Am. Bull.*, 62, p. 355-372.

<http://ic.ucsc.edu/~casey/eart150/Lectures/Rheology/13rheology.htm>

Jackson, M. P. A. and Talbot C.J., 1991. A glossary of salt tectonics. *Geological Circular 91-4*. Bureau of Economic Geology Austin Texas.

Jackson, M. P. A., Roberts, D., and Snelson, S., 1995 eds., Salt tectonics: a global perspective: *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 65, p. 333–351.

Jackson, M. P. A., Cramez, C., and Fonck, J. -M., 2000, Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks: *Marine and Petroleum Geology*, v. 17, p. 477–498.

Kidston, A.G., Brown, D.E., Alheim, B. and B.M. Smith, 2002. Hydrocarbon Potential of the Deepwater Scotian Slope, *Canada Nova Scotia Offshore Petroleum Board Publication*, Oct. 2002 Vers. 1.0, Halifax Nova Scotia Canada 111 pgs.

Kincaid, C., and P. Olson, 1987. An experimental study of subduction and slab migration. *J. Geophys. Res.*, 92, 13–840.

Koyi, H., 1988. Experimental modeling of role of gravity and lateral shortening in Zagros mountain belt, *AAPG Bulletin*, 72, 1381-1394.

Koyi, H., 1996. "Mode of internal deformation in sand wedges." *J. Struct. Geol.*, 17, n. 2, p 293-300.

Koyi, H.A., and A. Skelton, 2001. Centrifuge modelling of the evolution of low-angle detachment faults from high-angle normal faults, *Journal of Structural Geology*, 23, 1179-1185.

Krantz, R. W., 1991. "Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures." *Tectonophysics*, 188, 203-207.

Lui, S. and Dixon, J.M., 1990. "Centrifuge modelling of thrust faulting. Structural variations along strike in fold-thrust belts." *Tectonophysics*, 188: 39-62.

Mandl, G., 1988. "Mechanics of Tectonic Faulting." Elsevier, Amsterdam, 407 pp.

Marton, L.G., Tari, G.C. and Lehmann, C.T., 2000. Evolution of the Angolan Passive Margin, West Africa, with emphasis on post-salt structural styles. In: W. Mohriac and M. Talwani (Editors), *Atlantic Rifts and Continental margins*. American Geophysical Union, Washington, pp. 129- 149.

Mauduit, T., Guerin, G., Brun, J.P., Lecanu, H., 1997, Raft tectonics : the effects of basal slope angle and sedimentation rate on progressive extension. *J. Struct. Geol.* 19, 1219-1230.

McClay, K.R., 1990a. "Extensional fault systems in sedimentary basins. A review of analogue model studies." *Marine and Petroleum Geology*, v. 7, p. 206-223.

McClay, K.R., 1990b. "Deformation mechanics in analogue models of extensional fault system." In Rutter, E.H. and Knipe, R.J. (eds). *Deformation mechanism. Rheology and Tectonics*. Geol. Soc. of London Special Publication v. 54.

McClay, K.R., 1992. "Glossary of thrust tectonics terms." In: *Thrust tectonics*. London, Chapman & Hall, K.R. McClay Ed.

Modica, C.J. & Brush, E.R. 2004. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. *AAPG Bull.*, 88, 923–945.

Mohriak, W.U., Macedo, J.M., Castellani, R.T., Rangel, H.D., Barros, A.Z.N., Latgé, M.A.L., Mizusaki, A.M.P., Szatmari, P., Demercian, L.S., Rizzo, J.G. and Aires, J.R., 1995, Salt tectonics and structural styles in deep water province of the Cabo Frio region, Rio de Janeiro, Brasil. In M.P.A.Jackson, D.G.Roberts and S.Snelson, eds., *Salt tectonics: a global perspective. AAPG Memoir 65*, p. 109-151.

Mulugeta, G. 1985. Dynamic models of continental rift-valley Systems. *Tectonophysics*. 113. 49-75.

Nettelton, L.L., 1934. "Fluid mechanics of salt domes." *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 18: 1175-1204.

Nettelton, L.L. & Elkins, T.A., 1947. "Geological models made from granular materials." *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 28: 451-466.

Passchier, C.W. & Sokoutis, D. 1993. Experimental modelling of mantled porphyroclasts. *Journal of Structural Geology* 15:895-909.

Peel, F.J., C.J. Travis and J.R. Hossack, 1995, Genetic structural provinces and salt tectonics of the Cenozoic offshore U.S. Gulf of Mexico: a preliminary analysis, in M.P.A. Jackson, D.G. Roberts and S. Snedson, eds., Salt tectonics: a global perspective. *AAPG Memoir* 65, p. 109-151.

Ramberg, H., 1967. Model experimentation of the effect of gravity on tectonic processes, *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 14, 307-329.

Ramberg, H., 1970. Model studies in relation to intrusion of plutonic bodies, in Mechanism of igneous intrusion, edited by G. Newall, and N. Rast, pp. 261-286.

Ramberg, H., 1981. Gravity, deformation and the Earth's crust, Academic Press, London.

Richard, P., & Krantz R. W., 1991. "Experiments on fault reactivation in strike-slip mode." *Tectonophysics*, v. 188, p. 117-131.

Rossetti, F., C. Faccenna, G. Ranalli, and F. Storti, 2000. Convergence rate-dependent growth of experimental viscous orogenic wedges, *Earth and Planetary Science Letters*, 178, 367-372.

Rowan, M.G., T.F. Lawton, K.A. Giles, and R.A. Ratliff, 2003, Near-diapir deformation in La Popa basin, Mexico, and the northern Gulf of Mexico. *A general model for passive diapirism*: AAPG Bulletin, v. 87, p. 733-756.

Rowan, M.G., F.J. Peel, and B.C. Vendeville, 2004, Gravity-driven foldbelts on passive margins, in K.R. McClay, ed., *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*: AAPG Memoir 82, p. 157-182.

Schardt, H., 1884. Geological Studies in the Pays-D'Enhant Vaudois, *Bull. de la Soc. Vaudois des Sci. Nat.*, xx, 143-146.

Shemenda, A.I., and A.L. Grocholsky, 1992. Physical modelling of lithosphere subduction in collision zones, *Tectonophysics*, 216, 273-290.

Shimeld J. W., Hansen D. M., Williamson M. A., and Lykke-Andersen H. 2004 Development of a major polygonal fault system in Upper Cretaceous chalk and Cenozoic mudrocks of the Sable Subbasin, Canadian Atlantic margin. *Marine and Petroleum Geology* 21(9), 1205-1219.

Spiers, C.J., Urai, J.L., Lister, G.S., 1988. "The effect of brine (inherent or added) on rheology and deformation mechanisms in salt rocks." *Second Conference on the Mechanical Behaviour of Salt*, Hannover, FRG, September 24-28, 1984, Transtech Publ., Clausthal-Zellerfeld, pp. 89-102.

Szatmari, P., Guerra, C.M. and Pequeno, M.A., 1996, genesis of large counter-regional normal fault by flow of Cretaceous salt in the South Atlantic Santos Basin, Brasil. *From Alsop, G.I., Blundell, D.J. and Davison I. (eds.), Salt Tectonics*, Geological Society Spec. Publ. n° 100, 259-264.

Tari, J. M., Katrina Coterill, Gabor C., and Paul R. Ashton, 2002. Comparison of depositional sequences and tectonic styles among the West African deepwater frontiers of western Ivory Coast, southern Equatorial Guinea, and northern Namibia (*in West Africa; a special issue on an emerging world petroleum province*) *The Leading Edge (Tulsa, OK)* (November 2002), 21(11):1103-1111

Talbot, C.J., 1977. Inclined and asymmetric upward-moving gravity structures, *Tectonophysics*, 42, 159-181.

Tanner, W.F., Williams, G.K., 1968. "Model diapirs, plasticity, and tension." *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, 8, p. 10-15.

Tapponnier, R., G. Peltzer, A.Y. Le Dain, R. Armijo, and P. Cobbold, 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiments with plasticine, *Geology*, 10, 611-616.

Trudgill, B.D., Rowan, M.G., Fiduk, J.C., Weimer, P., Gale, P.E., Korn, B.E., Phair, R.L., Gafford, W.T., Roberts, G.R., Dobbs, S.W., 1999. The Perdido foldbelt, Northwest deep Gulf of Mexico. Part 1: structural geometry, evolution and regional implications, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83, 88-113.

Urai, J.L., Spiers, C.J., Zwart, H.J. and Lister, G.S., 1986. "Weakening of rock salt by water during long term creep." *Nature*, 324, 554-557.

Vendeville, B.C., 1988. "Modeles experimentaux de fracturation de la couverture controlee par des failles nonnales dans le socle." *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307 (II): 1013-1019.

Vendeville, B.C., 1991. "Thin-skinned compressional structures above frictional-plastic and viscous decollement layers." *Geol. Soc. Am., Abstr. Programs, San Diego, Annual Meeting*, p. A423.

Vendeville, B.C., & Cobbold, P., 1987. "Glissement gravitaires synsedimentaires et failles normales listrique. Modeles experimentaux." *C.R. Acad Sci. Paris*, 305 (II): 1313- 1320.

Vendeville, B.C., & Jackson, M.P.A., 1992a. "The rise of diapirs during thin-skinned extension." *Mar. Pet. Geol.*, 9(4): 331-353.

Vendeville, B.C., & Jackson, M.P.A., 1992b. "The fall of diapirs during thin-skinned extension." *Mar. Pet. Geol.*, 9(4): 354-371.

Vendeville, B.C., Eisendstadt, G., Withjack, M.,O., 1995. "Introduction to experimental modeling of tectonic processes." *Geol. Soc. Am. Annual Meet.*

Vendeville, B. C., and Nilsen, K. T., 1995, *Episodic growth of salt diapirs driven by horizontal shortening*, in Travis, C. J., Vendeville, B. C., Harrison, Holly, Peel, F. J., Hudec, M. R., and Perkins, B. F., eds., *Salt, sediment, and hydrocarbons*, 16th Annual Research Conference Program and Extended Abstracts: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Gulf Coast Section, p. 285–295.

Vilotte, J.P., M. Daignieres And R. Madariaga, 1982. Numerical modeling of intraplate deformation : simple mechanical models of continental collision. *J. Geophys. Res.*, B.87, 10709-10728.

Wade, J.A. and MacLean, B.C. 1990, The Geology of the southeastern margin of Canada, Chapter 5 in *Geology of the Continental Margin of Eastern Canada*, M.J. Keen and G.L. Williams (eds.); *Geological Survey of Canada*, Geology of Canada, no. 2, p. 167-238.

Weijermars, R., 1986a. "Flow behaviour and physical chemistry of bouncing putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications." *Tectonophysics*, 124, 325-358.

Weijermars, R., 1992. "Progressive deformation in anisotropic rocks." *J. Struct. Geol.*, 14, p. 723-742.

Weijermars, R., Jackson, M.P.A., & Vendeville, B., 1993. "Rheological and tectonic modeling of salt provinces." *Tectonophysics*, 217, 143-174.

Weijermars, R., & Schmeling, H., 1986. "Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity)." *Phys. Earth Planet Inter.*, 43, p.316- 330.

Willis, B., 1893. "The mechanics of Appalachian structure." U.S. Geol. Survey, 13th Annual Report, Part 2, p. 211-281.

Withjack, M.O., & Jamison, W.R., 1986. "Deformation produced by oblique rifting." *Tectonophysics*, 126, p. 99 -124.

Worrall, D.M. and Snelson, s., 1989. "Evolution of the northern Gulf of Mexico, with emphasis on Cenozoic growth faulting and the role of salt." In: A. W. Bally and A.R. Palmer (Editors), *The Geology of North America -An Overview. Geol. Soc. Am., The Geology of North America*, A: 97-138.

Wu, S.A., A.W. Bally, and C. Cramez, 1990, Allochthonous salt, structure and stratigraphy of the northeastern Gulf of Mexico, part II: structure: *Marine and Petroleum Geology* v.7, p. 334-370.

Yassir, N.A., and Bell, J.S., 1994, Abnormally high fluid pressures and associated porosities and stress regimes in sedimentary basins, in *Rock mechanics in petroleum engineering*, Eurock '94 proceedings: A.A. Balkema, Rotterdam, p. 879-886. Later published in 1996: SPE Formation Evaluation, v. 11, no. 1, p. 5-10.