

I quaderni del consolidamento del terreno con resine espandenti

GEOSEC



TECNICA
DELLO
STATO
FESSURATIVO
DEFORMATIVO
DEL COSTRUITO

 **GEOSEC**

NUMERO
3

TECNICA DELLO STATO FESSURATIVO DEFORMATIVO DEL COSTRUITO.

Marco d'ATTOLI¹

1, GEOSEC International s.r.l. - Italy

1. Quadri Isostatici nei muri

1.1. Fratture su superfici piane

1.1.1 Linee isostatiche

Quando un corpo è sollecitato da forze esterne si instaurano nel suo interno delle tensioni, che possono decomporsi in una componente normale, cioè perpendicolare alla superficie considerata ed in una tangenziale parallela alla superficie stessa.

L'entità di tali forze all'interno del corpo dipende dal punto considerato e dal piano ideale passante per quel punto, infatti fissato un punto all'interno dell'oggetto sollecitato, immaginiamo poi di ruotare il piano rispetto al quale vogliamo calcolare le tensioni applicate, intorno a quel punto: la tensione che si avrà, può essere graficamente rappresentata con un vettore che cambia modulo a seconda dell'orientamento del piano stesso. Questo vuol dire che lo stato tensionale, in un punto del corpo, non può essere rappresentato semplicemente con un vettore ma con un tensore. Tra tutti i piani passanti per il punto in questione vi è sempre un piano in cui la tensione vi risulta perpendicolare, in tal caso la tensione viene chiamata principale.

Le linee isostatiche rappresentano quelle traiettorie costruite dalle tangenti ai vettori delle tensioni principali. In Figura 1 è riportato il caso di un corpo incastrato e caricato in punta da una forza F , all'interno dello stesso sono riportate linee isostatiche continue che sono relative alle tensioni principali di trazione, mentre quelle tratteggiate sono relative a tensioni principali di compressione.

Si noti che i vettori che tendono a comprimere l'elemento materiale cubico sono tangenti alle linee

isostatiche tratteggiate dette *isostatiche di minimo*, mentre le frecce che lo portano in trazione, sono tangenti alle linee isostatiche continue dette *di massimo*.

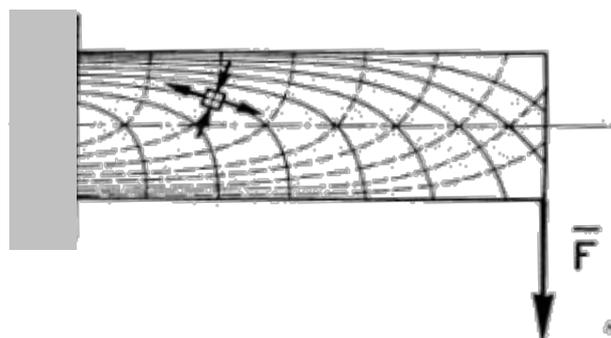


Figura 1 - Linee isostatiche su corpo incastrato caricato in punta.

1.1.2 Frattura iniziale

Secondo quanto sopra riportato, nei solidi reali, fragili e approssimabili a quelli piani, come ad esempio i corpi di fabbrica, la frattura elementare del materiale si stabilisce normalmente alla linea sostegno della tensione principale di trazione isostatica di massimo, nel punto in cui questa supera quella ammissibile per il materiale (la tensione minima -con tensioni positive di trazione- è pari a zero).

In tale punto detto di *originaria rottura*, il materiale subisce una frattura elementare Δ_f normale alla tensione σ_a e sovrapposta alla isostatica di minimo.

La rottura fragile non è mai preceduta da apprezzabili deformazioni, è istantanea e caratterizzata da fessurazioni originarie capillari che si stabiliscono all'atto della rottura iniziale in un intorno del punto interessato di originaria rottura lungo le linee di minor resistenza.

Le fessurazioni, durante la fase di rottura, hanno ampiezza piccolissima che aumenta passando da una fase capillare iniziale, a una fase capillare progredita, ma in mancanza di adattamenti plastici i suoi rami capillari iniziali conservano immutata la loro forma geometrica nel progredire del dissesto, tendendo ad accrescere prevalentemente le ampiezze fessurative più che le lunghezze.

A partire dalla fase capillare progredita in un solido fessurato sono riconoscibili i due cigli fessurativi f e f_1 di figura 2 e in questi i punti corrispondenti A , A_1 , B e B_1 . Nelle fasi iniziali fessurative le corde congiungenti A e A_1 , B e B_1 , individuano le linee di azione delle corrispondenti tensioni che provocano la rottura.

Il riconoscimento delle varie coppie di punti corrispondenti è reso possibile dalle deviazioni delle superfici di frattura dal loro andamento teorico, deviazioni che danno luogo a cigli fessurativi sinuosi, o fittamente spezzati che rendono chiara la corrispondenza fra i punti.

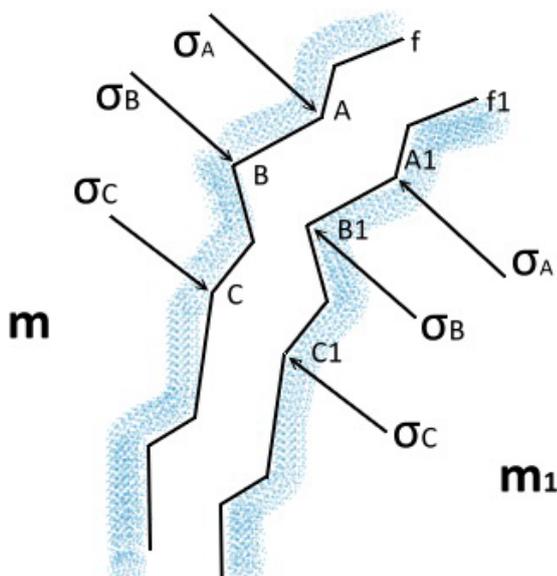


Figura 2 - Cigli fessurativi di una frattura.

Pertanto se f e f_1 , sono i cigli di un breve tronco fessurativo in fase iniziale, è facile riconoscere che nel punto A la rottura ha avuto per effetto di trasferire l'elemento materiale da A in A_1 secondo una traiettoria piccolissima che si identifica con la corda A e A_1 , lo stesso vale per tutti gli altri punti.

1.1.3. Diretrice fessurativa

La direttrice fessurativa nei solidi piani evolve con tre modalità distinte:

- A ramo unico lungo la isostatica di minimo.

Se nella successiva propagazione della frattura tutte le rotture elementari si dislocano lungo la stessa isostatica di minimo, in tutti i punti resta verificata la condizione di ortogonalità tra la tangente alla linea media della curva fessurativa e la direzione della σ_a come presentato in figura 3.

In tal caso le corde congiungenti le coppie di punti corrispondenti A e A_1 , rimangono normali alle tangenti della linea di frattura.

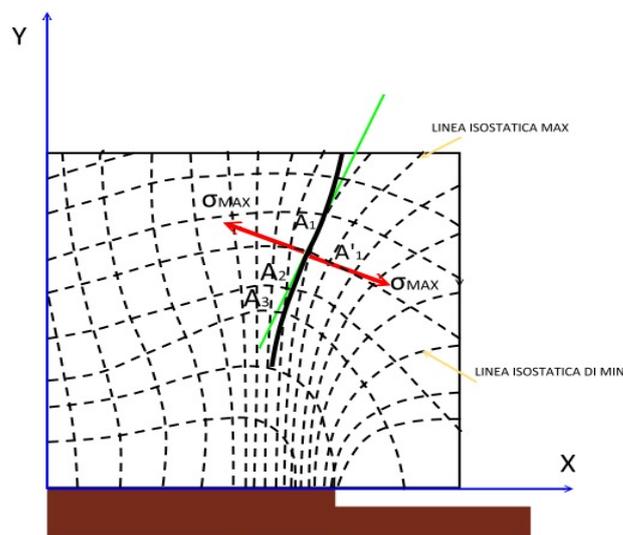


Figura 3 - Diretrice fessurativa a ramo unico.

- A rami multipli lungo più isostatiche di minimo adiacenti.

Se più fratture elementari adiacenti, creatisi simultaneamente, tendono a propagarsi lungo le corrispondenti isostatiche di minimo, resta verificata la condizione di ortogonalità tra le tangenti alle linee medie delle singole curve fessurative e la direzione delle σ_a , come presentato in figura 4.

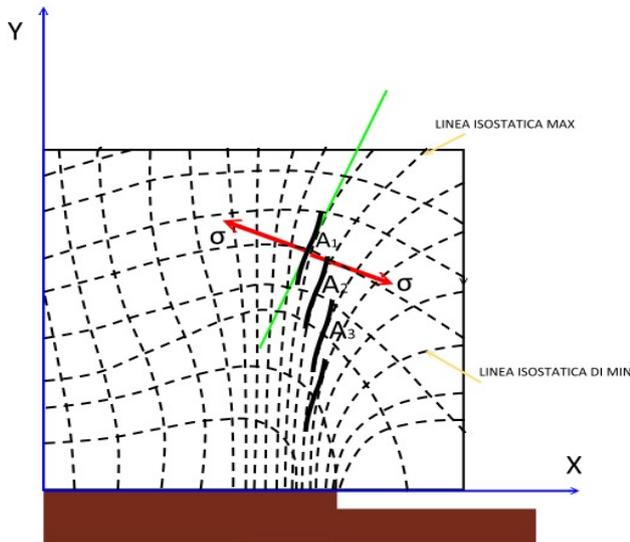


Figura 4 - Direttrice fessurativa a rami multipli.

- A ramo unico fuori le isostatiche di minimo.

Se più fratture elementari adiacenti, creatisi simultaneamente, si congiungono al di fuori di una qualsivoglia isostatica di minimo, in tal caso l'ortogonalità tra la tangente alla linea media della curva fessurativa e la direzione della σ_a non sussiste (figura 5).

La zona mediana della direttrice fessurativa viene detta comunemente *ventre*, mentre i due estremi *cuspidi*. La forma geometrica assunta dalla direttrice fessurativa non si sviluppa casualmente, ma è dipendente dai carichi, dalle caratteristiche del solido e dalla presenza di difetti o imperfezioni preesistenti nei punti di rottura, che ne condizionano lo stato tensionale interno.

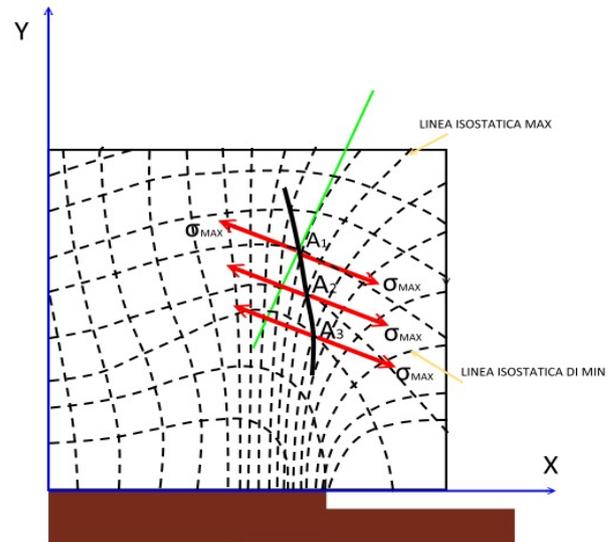


Figura 5 - Direttrice fessurativa a ramo unico fuori le isostatiche di minimo.

1.1.4. I quadri isostatici nei muri con aperture

Dato un muro isolato di forma prismatica di peso specifico γ uniforme, privo di carichi al suo contorno superiore oppure uniformemente caricato su di esso (per esempio da un solaio di copertura), se il muro fosse privo di finestre od altre aperture il quadro isostatico sarebbe costituito da due fasci di rette parallele, l'uno verticale (isostatiche di minima) e l'altro orizzontale (isostatiche di massima).

Le direzioni delle tensioni principali sarebbero cioè, in ogni punto, verticali ed orizzontali. Se supponiamo il muro di spessore costante per tutta l'altezza H , le sollecitazioni unitarie in un punto cresceranno in funzione dell'altezza di muro soprastante al punto stesso per cui le σ_{\min} e le σ_{\max} assumeranno il loro massimo valore assoluto sulla base di appoggio del muro.

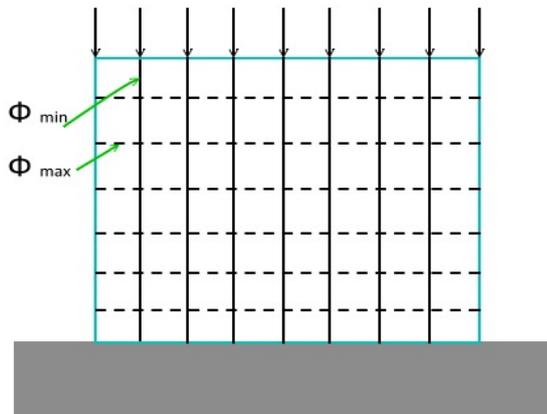


Figura 6 - Quadro isostatico in muro privo di aperture.

Oltre un certo limite del carico unitario le fessurazioni inizierebbero a comparire in corrispondenza della base di appoggio e si propagherebbero verso l'alto sulla verticale, identificandosi con le isostatiche di minima.

Se il muro presenta invece delle aperture (o se in esso vengono praticate delle nuove aperture a strappo) il quadro isostatico risulterà deformato rispetto al precedente. Le linee di forza verticali, non potendo attraversare i vuoti che non offrono alcuna reazione, si spostano convogliandosi tutte nei volumi pieni adiacenti le aperture.

Di conseguenza nei tratti di muro posti sull'orizzontale di ogni fila di aperture le isostatiche si infittiscono tanto più quanto più sono larghe le aperture stesse nei confronti dei pieni fra esse interposti.

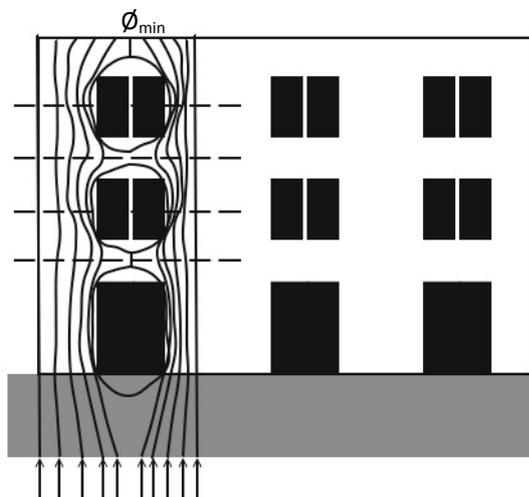


Figura 7 - Andamento delle linee isostatiche in muro con presenza di aperture.

Non solo, ma tale infittimento delle isostatiche è più marcato nelle vicinanze delle linee di spalletta delle aperture e in particolare lungo l'orizzontale media delle spallette medesime.

L'isostatica di minima passante per la verticale media dei pieni rimane verticale, quella passante per la verticale media dei vuoti rimane verticale per piccoli tratti intermedi fra le aperture degenerando in due semiparabole che lambiscono i due spigoli di architrave superiormente e i due spigoli di parapetto nella parte inferiore.

La concentrazione di tensioni nelle zone di spalletta fa sì che quando i superano i limiti di resistenza del materiale murario esso si fessura, proprio in quelle zone, seguendo l'andamento della isostatica di minima.

L'inizio della fessurazione avverrà in corrispondenza della orizzontale media delle aperture per proseguire lungo le semiparabole tangenti agli spigoli delle aperture medesime.

2. Cedimento delle Fondazioni

2.1 Introduzione

Una membratura (per esempio un muro portante) sostenuta dal terreno, imprime in questo una sollecitazione che non si estingue negli strati immediatamente sottostanti la fondazione stessa ma si distribuisce nel sottosuolo con valori progressivamente decrescenti a partire dal piano di fondazione.

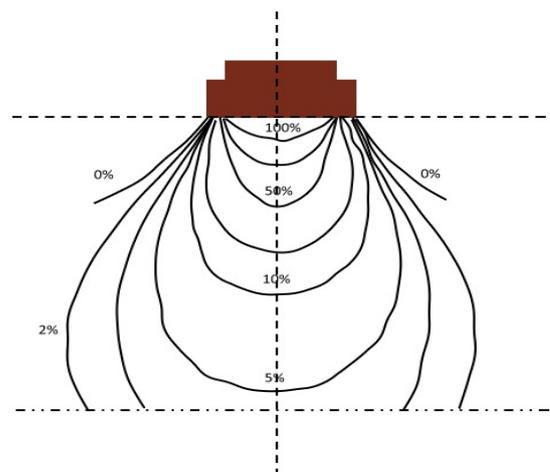


Figura 8 - Bulbo caratteristico delle sollecitazioni in sottofondazione (Kögler e Scheidig, 1933-34).

La distribuzione e l'andamento delle isobare (linee di uguale pressione) riportate nella precedente figura è stato studiato e controllato sperimentalmente dal Kögler e dallo Scheidig e si riferisce, nel caso particolare, ad una struttura di fondazione di pianta quadrata, (plinto o pilone) di mt 3,00 di lato, poggiata direttamente sul terreno. Osservando la figura si rileva facilmente che, indipendentemente dal carico che sopporta il plinto, la profondità in cui sussiste ancora una certa percentuale di compressione unitaria dipende dalle dimensioni della superficie di appoggio: più è grande detta superficie e più profondi saranno gli strati del sottosuolo interessati dalla sollecitazione. E' ovvio che se il carico sul terreno, immediatamente sotto la superficie di appoggio, è modesto, ancor più modeste saranno le percentuali di carico via via che si procede nel sottosuolo. Viceversa se il carico sotto il piano di fondazione è notevole saranno di entità non trascurabile anche le sollecitazioni negli strati più profondi del terreno. Da quanto sopra si rileva facilmente che i vecchi sistemi di prova di resistenza del terreno, effettuati direttamente sul piano di posa delle fondazioni, conducono a risultati del tutto inattendibili. E ciò è tanto più vero quanto più grandi sono le dimensioni della fondazione.

Supponiamo ad esempio di dover appoggiare una fondazione a mt 1.50 di profondità dal piano di campagna, e che tale fondazione (di tipo lineare, atta a sostenere un muro) abbia una larghezza di due metri. A mt 1.50 dal piano di campagna, cioè alla profondità del piano di fondazione, il terreno sia costituito da sabbia con tracce di argilla. Eseguendo delle prove di compressione dirette su tale terreno si potrebbe stabilire che esso è in grado di sopportare, ad esempio 2 kg/cmq. In base a tale risultato si può dimensionare la larghezza della fondazione (per esempio mt 2.00 come supposto prima). La larghezza così trovata andrebbe bene se lo strato di sabbia avesse un ragguardevole spessore (5-6 mt). Se invece il banco di sabbia fosse limitato allo spessore di due metri e al disotto di esso fosse presente uno strato di argilla plastica, questa ultima sarebbe sottoposta ad una sollecitazione di compressione unitaria pari a circa la metà del carico unitario presente nella superficie di appoggio della fondazione, cioè ad 1 kg/cmq. Sotto questo carico l'argilla plastica cederebbe trascinando lo strato soprastante e, con esso, la fondazione stessa. Quanto sopra dimostra l'opportunità, anzi la necessità, tanto nel progetto di una fondazione nuova, quanto nella verifica di stabilità di una vecchia struttura fondale, di eseguire prelievi e prove del terreno a profondità tanto più grandi quanto maggiori siano le dimensioni della fondazione.

Ai fini pratici risultano utili altri diagrammi (sostanzialmente simili a quello della figura precedente), che gli stessi Kögler e Scheidig hanno tracciato, della compressione verticale agente a varie profondità in funzione della dimensione della fondazione.

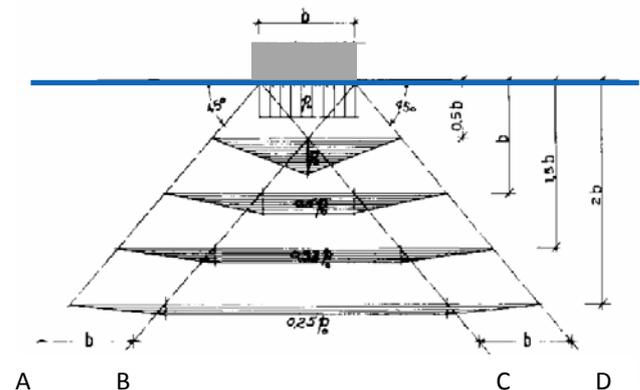


Figura 9 - Diagramma relativo ad una fondazione di tipo lineare con carico unitario p_0 uniformemente distribuito (Kögler e Scheidig, 1933-34).

In esso si vede chiaramente che la compressione unitaria p_0 presente immediatamente sotto il piano di appoggio della fondazione, mantiene lo stesso valore p_0 fino ad una profondità pari alla metà della larghezza della fondazione, cioè fino a $b/2$.

Aumentando la profondità la compressione unitaria diminuisce, mantenendosi costante nella zona compresa tra le rette B e C, partenti dai lembi esterni della fondazione ed inclinate di 45° sull'orizzontale, per poi raccordarsi, con tratti lineari, nei punti di intersezione della linea base del diagramma con le rette A e D, anch'esse inclinate 45° sull'orizzontale.

Come si vede dal diagramma, ad una profondità pari alla metà della larghezza b della fondazione, la sollecitazione unitaria massima p_0 rimane uguale a quella presente sul piano di fondazione ad una profondità pari alla larghezza della fondazione la sollecitazione unitaria massima diventa la metà ad una profondità pari a 1,5 volte b la sollecitazione diventa $0,33 p_0$ cioè un terzo di quella presente sul piano di fondazione. Ad una profondità doppia della larghezza della fondazione la sollecitazione diventa pari a $0,25 p_0$, cioè ad $\frac{1}{4}$ di p_0 . E così di seguito per profondità maggiori.

$$p'_o = (b / 2) / Z p_o$$

La diminuzione della pressione unitaria massima col crescere della profondità dal piano di fondazione può essere quindi espresso dalla relazione, ove:

b = larghezza della fondazione lineare;
Z = profondità dal piano di appoggio della fondazione;
p_o = pressione unitaria sul piano di fondazione.

La relazione è valida per valori di **Z** maggiori di **b/2** in quanto per profondità minori o uguali a **b/2** il valore della pressione rimane costante e uguale a **p_o**.

Nei casi di dissesti dovuti a cedimento di strati di terreno al di sotto della fondazione e di scarsa resistenza unitaria non si ottiene alcun miglioramento delle condizioni statiche allargando semplicemente la fondazione preesistente. Nel caso di cedimento di fondazione e qualora si eseguano trivellazioni di saggio sul terreno per accertarne la natura, e quindi la resistenza, è necessario spingere tali indagini a profondità in cui la sollecitazione unitaria risulti trascurabile. Tale profondità si aggira su 4-5 volte la larghezza della fondazione a partire dal piano di posa della fondazione medesima. L'allargamento fondale per necessità di adeguamento delle fondazioni a nuovi carichi andrà ad interessare strati di terreno profondi dei quali è necessario conoscere le caratteristiche prima che vengano sottoposti a carichi per i quali potrebbero non essere adatti.

2.2 Classificazione dei cedimenti fondali

Cedimenti: spostamenti relativi fra due zone della medesima struttura. I cedimenti delle fondazioni superficiali sono gli spostamenti verticali del piano di posa, e sono il risultato delle deformazioni verticali del terreno sottostante la fondazione.

Tali deformazioni sono la conseguenza di un'alterazione dello stato di tensione, che in generale può essere prodotta dal carico trasmesso dalla fondazione stessa o da altre fondazioni vicine, o anche da una variazione delle pressioni interstiziali, ad esempio per un abbassamento del livello di falda. Limitandoci al caso del carico trasmesso dalla fondazione, la stima dei cedimenti attesi è necessaria per valutarne l'ammissibilità in condizioni di esercizio, e quindi per valori del carico e delle tensioni indotte molto inferiori a quelli che producono la rottura del terreno.

Con riferimento ad un muro continuo di lunghezza indefinita, di altezza *h* e di spessore costante *b*,

supponendo che una parte di detto muro si ponga in moto relativo rispetto all'altra parte di muro che rimane ferma, il suddetto moto (cedimento) può presentarsi nelle seguenti forme:

- Cedimento per traslazione orizzontale
- Cedimento per traslazione verticale
- Cedimento per rotazione intorno ad un asse.

2.2.1. Origine e classificazione dei cedimenti di fondazione

La meccanica dei problemi di movimento del terreno di fondazione e le relative conseguenti ripercussioni sull'involucro abitativo fuori terra sono ancor oggi uno dei fenomeni geotecnici più importanti nel settore delle costruzioni e dell'ingegneria civile. I cedimenti del terreno di fondazione infatti si esplicitano e manifestano principalmente attraverso l'evoluzione di un quadro fessurativo specifico sulle murature della struttura interessata. Allo scopo, infatti, occorre prestare sempre molta attenzione durante la fase di individuazione del fenomeno in quanto spesso la variegata complessità del sistema strutturale in esame favorisce l'espressione di altrettante variegate sovrapposizioni più o meno evidenti di ulteriori concause tali da rendere l'analisi tecnica complessa e confusa.

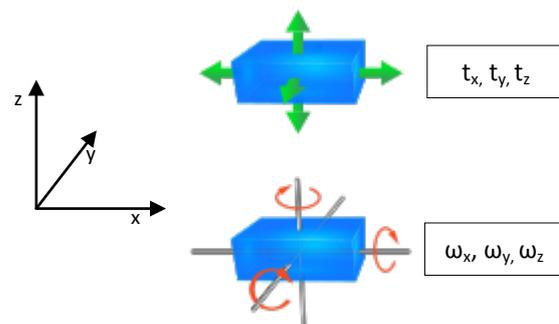


Figura 10 - Azioni fisiche sull'edificio: traslazione e rotazione.

In questo senso è plausibile che una diagnosi, in seguito ad un sistema di condizioni al contorno incerto o talvolta occultato possa indurre ad attribuire erroneamente al terreno la responsabilità del fenomeno di un dissesto strutturale. I dissesti infatti sono generalmente figli di due principali azioni fisiche sull'edificio (figura 10) quali le traslazioni (t_x , t_y ,

t_z) e le rotazioni rigide ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$). Esse sono riferibili sia a strutture intere di edifici che a porzioni di esse. Dunque le azioni mutue terreno – edificio sono certamente la causa principale dei principali quadri fessurativi da cedimento del terreno di fondazione e oggetto di questa specifica trattazione. Infatti nel sistema terreno - fondazione in seguito a variazioni più o meno consistenti degli equilibri fisici post assestamento (nel breve termine dopo la fine della costruzione dell'edificio) quali ad esempio mutate condizioni climatiche, geomorfologiche o idrauliche, si innesca un processo di ridefinizione naturale spontanea delle azioni e reazioni del sistema terreno – edificio tale da manifestare una ripresa evidente di fenomeni dinamici anche ciclici nel tempo che esprimono quadri fessurativi fuori terra precisi e definiti. Pertanto dopo aver introdotto inizialmente alla classificazione dei cedimenti di fondazione, forniremo breve cenno sui fenomeni dinamici più semplici e caratteristici di riferimento allo scopo di costruire un sintetico fondamento anche per deduzioni attendibili su quelli più complessi. Principalmente affronteremo il problema della meccanica del trascinamento, della traslazione e della rotazione nei cedimenti di fondazione.

2.2.2. Cause di innesco principali

Le cause principali fonte di innesco dei cedimenti del terreno sono sinteticamente raggruppabili in due categorie fondamentali:

- 1) Cedimenti da variazione della distribuzione dei carichi nel tempo sull'immobile, quali ad esempio ampliamenti strutturali con sviluppo prevalente verticale (sopraelevazioni), esecuzione di scavi limitrofi e/o aderenti anche temporanei etc.
- 2) Cedimenti indipendenti dai carichi trasmessi dall'edificio quali ad esempio quelli riconducibili a variazioni climatiche, variazioni quote di falda, vicinanza a pozzi attivi, vibrazioni dovute ad attività produttive, vicinanza a strade con traffico veicolare intenso, presenza di piante ad alto fusto etc.

2.2.3. Classificazione tecnica

Cedimenti intermedi: se "m" è il muro rettilineo a sezione rettangolare ($a \cdot h$) appoggiato interamente sul terreno di fondazione, tranne che per il tratto AB,

si avrà che proprio in corrispondenza delle sezioni A e B per ipotesi incastrate, le tensioni normali e tangenziali saranno massime.

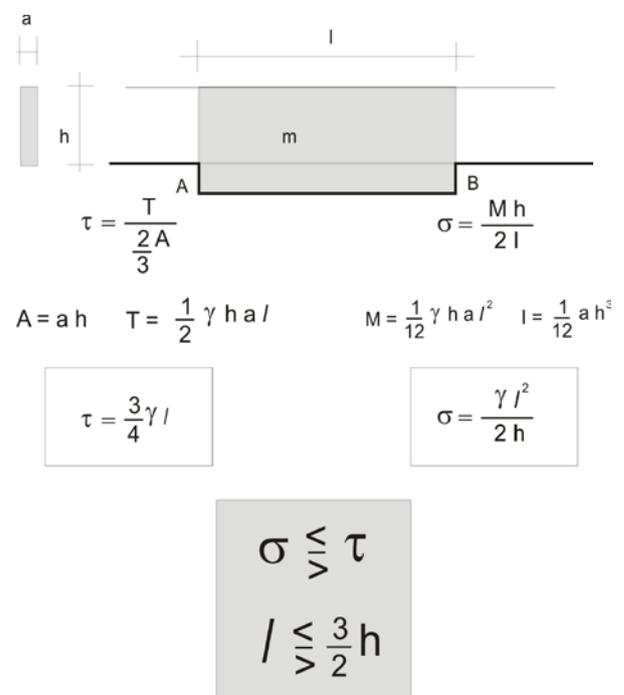


Figura 11 - Classificazione dei cedimenti intermedi.

a) Nello specifico siamo in grado di poter definire un *cedimento intermedio lungo* quando la "l" (lunghezza del fronte ceduto) risulta essere superiore ad 1,5 h (altezza del muro): $l > 1,5 h$ con ($\sigma > \tau$);

b) Analogamente definiremo *cedimento intermedio medio* quando: $l = 1,5 h$ con ($\sigma = \tau$);

c) e chiameremo *cedimento intermedio corto* quando: $l < 1,5 h$ con ($\sigma < \tau$).

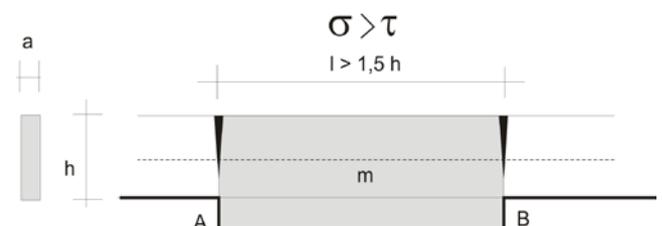


Figura 12 - Rappresentazione grafica cedimento intermedio lungo

Graficamente risulta evidente una geometria fessurativa iniziale in corrispondenza delle due sezioni di muro al limite del tratto interessato (A, B) dal cedimento, con sviluppo verticale estradosale. Analogamente nel caso di *cedimento intermedio corto* con $l < 1,5 h$ con $(\sigma < \tau)$ il quadro fessurativo si dispone in corrispondenza della mezzeria e con inclinazione approssimativa vicina ai 45°. Infine nel caso in cui $l = 1,5 h$ con $(\sigma = \tau)$ il quadro fessurativo assume simultaneamente la geometria indicata nella rappresentazione grafica di figura 13.

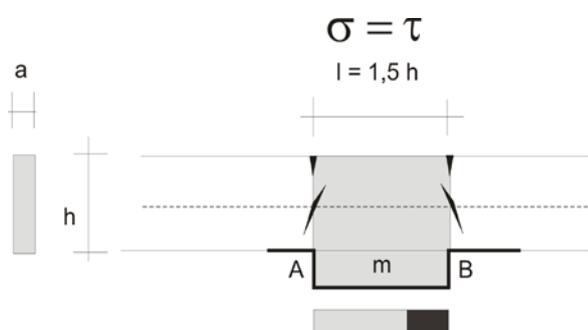


Figura 13 - Rappresentazione grafica cedimento intermedio medio

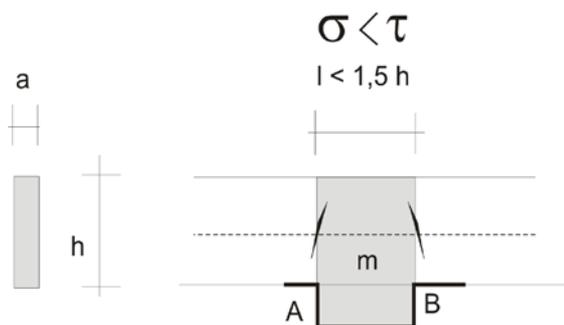


Figura 14 - Rappresentazione grafica cedimento intermedio corto

Cedimenti terminali: se "m" è il muro rettilineo di altezza "h" e spessore definito "a" di cui la lunghezza di parete interessata dal cedimento di fondazione è "l" si avranno anche per questo caso specifico dei *cedimenti terminali lunghi, medi e corti* e rispettivamente quando $l > 0,5 h$, oppure $l = 0,5 h$ e infine $l < 0,5 h$. Sempre riferendoci alle precedenti

considerazioni analitiche possiamo asserire che la tensione di trazione all'intradosso nella mezzeria risulta essere pari alla metà di quella risultante all'estradosso dell'appoggio, per cui si ha:

$$\tau = \frac{V}{\frac{2A}{3}}$$

$$\sigma = \frac{Mh}{2l}$$

$$A = ah \quad V = \gamma h a l$$

$$M = \frac{1}{2} \gamma h a l^2$$

$$\tau = \frac{3\gamma l}{2}$$

$$\sigma = \frac{3\gamma l^2}{h}$$

$$\sigma \leq \tau$$

$$l \leq \frac{h}{2}$$

Graficamente possiamo riassumere come segue:

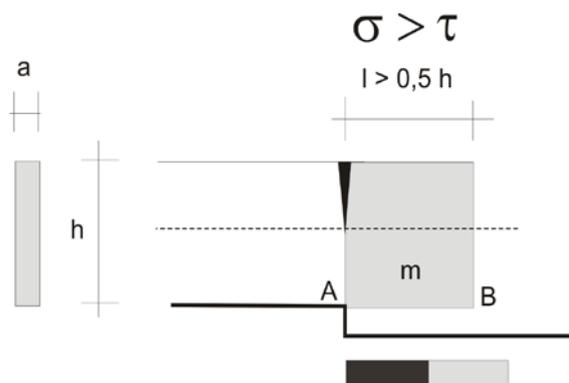


Figura 15 - Rappresentazione grafica cedimento terminale lungo

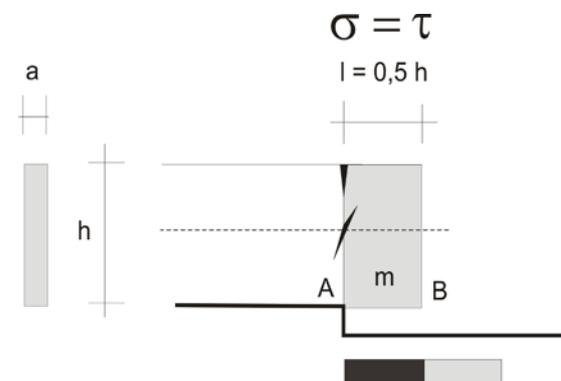


Figura 16 - Rappresentazione grafica cedimento terminale medio.

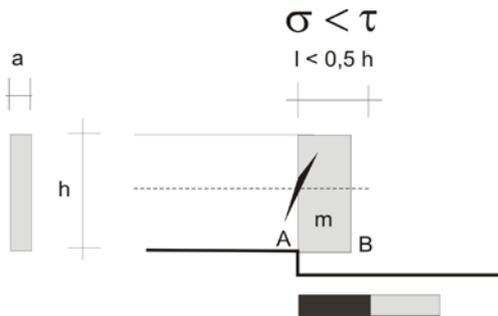


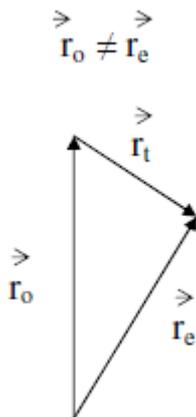
Figura 17 - Rappresentazione grafica cedimento terminale corto.

2.3. Meccanica del cedimento

2.3.1. Il trascinamento attivo

In presenza di un cedimento del terreno di fondazione la reazione del piano di fondazione può modificarsi anche sensibilmente fino a mancare completamente.

Infatti la reazione unitaria r_o prima del cedimento muta in un'altra reazione r_e denominata effettiva. Pertanto in ogni punto della base fondale risulta essere la seguente disuguaglianza geometrica:



Premesso che di seguito le relazioni riportate sono da intendersi di tipo vettoriale, indichiamo dunque con r_t la reazione unitaria che addizionata ad r_o fornisca istantaneamente r_e . In conseguenza per ogni punto della base del cedimenti si avrà:

$$r_o + r_t = r_e$$

Con r_t dunque intenderemo quella reazione unitaria di trascinamento attivo riferita alla base fondale del cedimento. Analiticamente possiamo ulteriormente definire:

$d\omega$ = elemento infinitesimo della base di fondazione

Ω = intera base di fondazione in sede di cedimento

Integrando otteniamo:

$$\int_0^{\Omega} r_t d\omega = \int_0^{\Omega} (r_e - r_o) d\omega$$

da cui risulta essere:

$$R_t = R_e - R_o$$

con le reazioni risultanti di cui sopra rispettivamente: delle reazioni unitarie originaria, di trascinamento ed effettiva. L'entità di queste forze risultanti è risultato dell'integrazione precedente volume dei corrispondenti diagrammi delle reazioni unitarie indicate. La risultante attiva di trascinamento è allora definita dalla differenza tra il diagramma della reazione effettiva e quello della reazione originaria nella porzione di base fondale soggetta a cedimento. Di seguito riportiamo una schematizzazione simulata di un potenziale fenomeno di cedimento casualmente lungo una delle tre direzioni cartesiane (t_y). Graficamente prima del cedimento visibilmente evidenziamo sia la reazione unitaria originaria lungo tutta la base di fondazione che il carico p (azione esercitante sul terreno da parte dell'edificio) uguale e contrario in ogni punto alla reazione originaria:

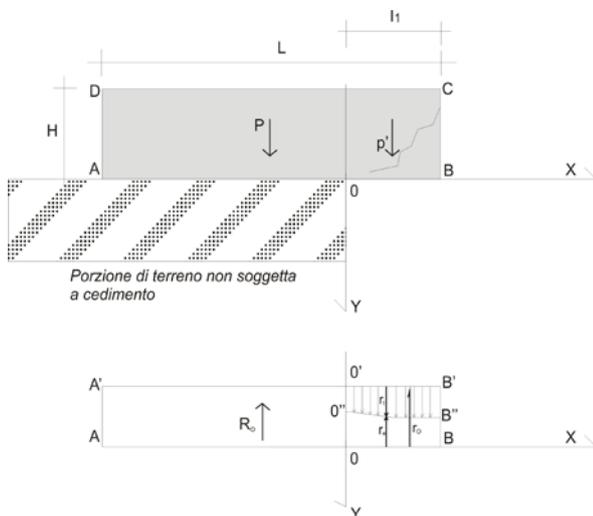


Figura 18 - Diagramma del trascinamento operato dal cedimento verticale

Come può si può effettivamente notare il diagramma di carico è identico (in modulo e direzione) al diagramma della reazione originaria ma con segno contrario (verso). Tale configurazione manifesta un equilibrio in ogni elemento superficiale tra il carico P e la forza reagente rendendo così di fatto la risultante delle forze elementari, così come il momento risultante, nulli relativamente ad una sezione generica trasversale. Col divenire del fenomeno del cedimento del terreno di fondazione, lungo tutto lo sviluppo della base ceduta si sostituisce il diagramma della reazione originaria con quello della reazione effettiva. Ipotizzando che il diagramma di carico resti immutato allora per ogni elemento della base di fondazione $d\omega$ il carico elementare p già equilibrato dalla forza reagente (reazione originaria elementare) non risulta più equilibrato dalla reazione effettiva elementare. La differenza tra le due componenti dunque risulta essere la componente della forza elementare di trascinamento $r_t d\omega$ e distribuita su tutta la base di fondazione interessata dal cedimento. Pertanto la forza risultante di dette forze elementari relativamente ad una sezione trasversale generica della base di fondazione risulta essere:

$$R_t' = \int_0^{\Omega} r_t d\omega$$

Con: R_t' = reazione attiva di trascinamento

E analogamente se x è l'ascissa dell'elemento $d\omega$:

$$M_t' = \int_0^{\Omega} r_t x d\omega$$

Con: M_t' = momento attivo di trascinamento

Precisando che sia R_t' che M_t' sono relativi ad una stessa sezione al limite del cedimento. Concludendo risulta chiaro che se prima del cedimento la forza ed il suo momento risultante relativamente ad una sezione generica trasversale del tronco erano nulli, durante il cedimento non sono più nulli ma eguagliano rispettivamente la forza attiva di trascinamento ed il momento attivo di trascinamento per la sezione considerata.

2.3.2. Il trascinamento reattivo

Volendo ora considerare l'edificio nella sua interezza comprensivo sia della porzione in sede di cedimento che quella in sede stabile e solida, verificiamo che fin dalle prime avvisaglie di innesco del cedimento del terreno, l'edificio risponde inequivocabilmente con la ricerca di un nuovo equilibrio compatibile con le nuove condizioni al contorno mutate.

Questo lento movimento alla ricerca dell'equilibrio fa sì che in ogni istante si eguagli la *reazione risultante effettiva* dell'intera base con il *peso* dell'intero solido interessato. Precisiamo però che l'uguaglianza tra queste risultanti non implica la medesima risposta per i diagrammi delle *reazioni effettive* e quello delle *reazioni originarie*.

Al contrario la già accennata differenza di questi ultimi, in porzione di fabbricato soggetta a cedimento, si ripresenta anche per la porzione di stabile minimamente interessata.

Dunque anche in questa sede il diagramma della *reazione originaria* muta in quello della *reazione effettiva* evidenziando l'insorgenza di una *reazione di trascinamento*.

Allo scopo chiameremo questa ultima *reazione reattiva di trascinamento* per distinguerla facilmente da quella per la porzione di stabile in sede di cedimento.

Se:

$d\omega$ = elemento infinitesimo della base intera di fondazione

Ω' = intera base di fondazione non in sede di cedimento

riprendendo il procedimento analitico del paragrafo precedente, con i dovuti parallelismi possiamo definire:

$$R_t'' = \int_0^{\Omega} r_t' d\omega$$

Con: R_t'' = reazione reattiva di trascinamento

E analogamente se x è l'ascissa dell'elemento $d\omega$:

$$M_t'' = \int_0^{\Omega} r_t' x d\omega$$

Con: M_t'' = momento reattivo di trascinamento

Rispetto alla sezione al limite del cedimento. Brevemente dunque si ottengono le relazioni tra le forze e i momenti attivi e reattivi di trascinamento e nella fattispecie abbiamo:

$$P = P' + P''$$

P = peso totale dell'edificio

P' = peso della porzione non soggetta a cedimento

P'' = peso della porzione in area di cedimento

$$R_e = R_e' + R_e''$$

R_e = risultante reazione effettiva

R_e' = risultante reazione attiva effettiva

R_e'' = risultante reazione reattiva effettiva

Per l'equilibrio delle forze in gioco si ha:

$$P + R_e = 0$$

Analogamente sempre per l'equilibrio si dovrà avere nulla la somma dei momenti, ipotizzando, rispetto ad un punto A nel piano i due bracci b e b_e rispettivamente le distanze delle due risultanti dal punto di riferimento A. Sostituendo nell'equazione di equilibrio dei momenti quella di equilibrio delle risultanti otterremo che per $P \neq 0$ si ha $b = b_e$

Riprendendo poi che:

$$R_e = R_n + R_t' + R_t''$$

Che sostituita nell'equazione di equilibrio delle risultanti:

$$P + R_n + R_t' + R_t'' = 0$$

Chiarito che lo stato di tensione internamente ad un solido soggetto a cedimento è ottenuto dalla somma della tensione originaria con quella derivante dal flusso delle reazioni unitarie attive e reattive di trascinamento, precisiamo che nonostante l'approccio rigoroso gli studi e le interpretazioni su modelli matematici si rivelano estremamente complessi proprio nella fase di determinazione delle reazioni di trascinamento. Concretamente pertanto spesso ci si deve affidare all'interpretazione intuitiva

dell'aspetto qualitativo delle grandezze in esame. Successivamente alla fessurazione del solido in esame (in conseguenza della variazione del sistema di forze esterne influenzanti) subentra un fenomeno di ricerca del nuovo equilibrio interno delle tensioni in gioco. In questa ulteriore fase sotto la progressiva e possibile mutazione delle forze e dei momenti di trascinamento, il solido tende a raggiungere una ultima configurazione di equilibrio anche amplificando le lesioni iniziali o aumentando il quadro fessurativo di partenza fino al completo distacco tra le porzioni di solido soggette a cedimento e quella in posto. In questa ultima sequenza le due porzioni di solido raggiungono nel distacco un successivo e autonomo equilibrio indipendente l'uno dall'altro. A questo nuovo e ultimo equilibrio concorrono soltanto il peso delle porzioni di solido e le reazioni del terreno interessato, mentre le forze ed i momenti di trascinamento si annullano. Infatti forze e momenti di trascinamento tendono progressivamente ad annullarsi con il distacco completo delle porzioni di solido interessate. Sostanzialmente possiamo dire che proprio grazie alle forze e ai momenti di trascinamento che con il minimo sforzo necessario il solido ritrova per natura un nuovo equilibrio di sistema.

2.3.3. La traslazione orizzontale

Fin da subito siamo in grado di distinguere la *traslazione orizzontale assoluta* come quella che interessa l'intero sistema strutturale dell'edificio, e quella *relativa*, se interessa una porzione dello stabile. Inoltre la traslazione orizzontale relativa può distinguersi ulteriormente in *longitudinale*, *trasversale* e *obliqua*. Dunque se la prima traslazione, quella relativa longitudinale si manifesta graficamente nel piano medio del muro, le altre seguenti rispettivamente si manifestano normale al piano medio e in una direzione intermedia tra le due precedenti. Di particolare rilevanza è l'aspetto che riconduce i fenomeni di traslazione orizzontale con particolare e significativa frequenza agli edifici che si distinguono per base fondale sensibilmente superficiale o poco sotto il piano di campagna e appoggiata su terreni argilloso – sabbiosi e sabbioso – argillosi. Infatti questi sistemi terreno – fondazione sono particolarmente sensibili alle “variazioni” stagionali climatiche, per cui in periodi particolarmente siccitosi si contraggono dando origine a fessurazioni verticali che dal piano di campagna scendono fino al di sotto dell'impianto

fondale. Conseguentemente con il divenire delle stagioni piovose gli stessi terreni si rigonfiano di acqua piovana e scatenano un fenomeno contrario di recupero fittizio del quadro fessurativo precedentemente evidenziato, grazie al movimento alternativo delle strutture murarie interessate. In fase di progetto, prima della realizzazione dell'opera, si prevencono i problemi e i conseguenti danni da traslazione orizzontale considerando di appoggiare le murature portanti su di un cordolo in c.a. continuo e tale da impedire il propagarsi delle dilatazioni del terreno alle membrature strutturali superiori. Talvolta un vespaio a regola d'arte e più profondo, invece, interrompe la continuità tra terreno di fondazione ed edificio assicurando un ottimo sistema di attenuazione della trasmissione del fenomeno ciclico di rigonfiamento e rilassamento del terreno all'edificio soprastante.

Traslazione longitudinale:

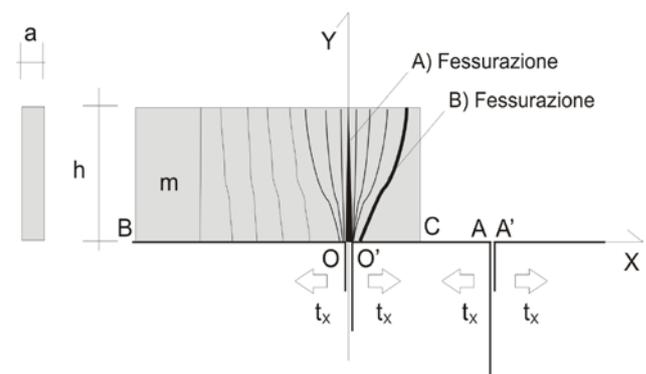


Figura 19 - Manifestazioni fessurative: la traslazione longitudinale.

Osserviamo in figura precedente infatti che le dilatazioni cicliche trovano le loro massime ampiezze nei valori $\Delta_{OO'}$ e $\Delta_{AA'}$. La geometria fessurativa inoltre assume andamenti precisi a seconda del contesto e variabili man mano che ci si allontana dall'asse delle Y: l'andamento dei punti affacciati tra i piani limite della fessurazione può variare da andamento regolare invariato ad accentuazione sensibile in corrispondenza dei punti OO' man mano decrescendo salendo verso l'alto come in schema A) di figura. Spostandoci poi invece dall'asse delle Y in senso orizzontale noteremo che le fessure possono assumere un andamento prossimo allo schema B) ovvero con inclinazione prossima anche ai 45° per la porzione di parete maggiormente interessata dal cedimento indicato in figura con tendenza a ritornare verticale verso le sezioni più lontane in B.

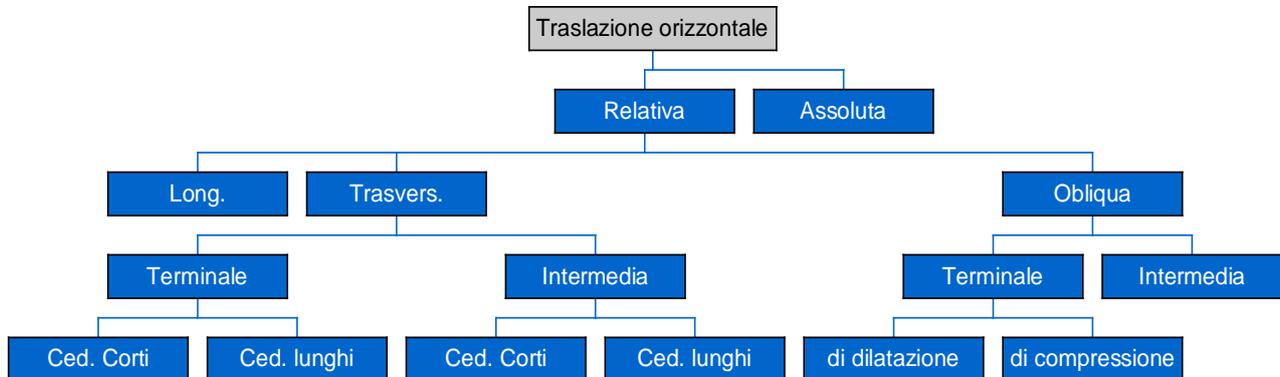


Figura 20 - Classificazione dei moti di traslazione orizzontale.

Traslazione Orizzontale Relativa Trasversale

Avviene nel piano normale a quello medio del muro, lungo l'asse Z, sotto la forma di trascinamento t_z .

In figura 21 è rappresentata una traslazione trasversale terminale, la quale è resa possibile dalle fenditure "f" presenti nel piano di posa del solido che rendono possibile, appunto, detta traslazione.

La forza in atto è rappresentata da una sollecitazione di trascinamento T applicata nel baricentro del piano di appoggio della parte in moto; tale forza di trascinamento T può essere spostata nel piano di frattura, aggiungendo ad essa il momento nel piano xy, generato dalla forza per lo spostamento l; il momento M può essere scomposto, poi, in due momenti elementari m_1 ed m_2 con assi paralleli rispettivamente all'asse x e all'asse y. La sezione al limite del cedimento è sottoposta ad uno sforzo di taglio (T) ad un momento flettente m_1 ed uno torcente m_2 . Il piano di frattura presenterà caratteristiche intermedie tra quelle proprie del taglio della flessione e della torsione. Inoltre, il piano di frattura sarà differente in relazione al tipo di cedimento (lungo, medio o corto) definito in relazione all'altezza del muro interessato con parametro di confronto $p = 1,5$.

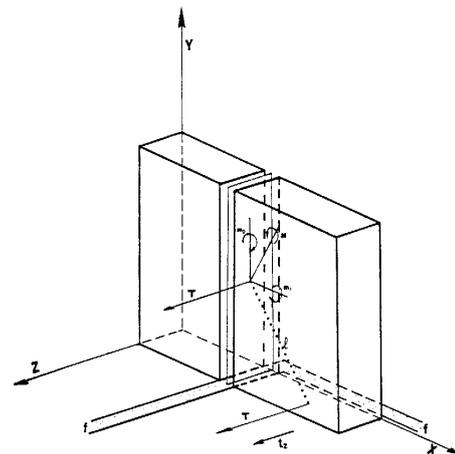


Figura 21 - Manifestazioni fessurative: la traslazione trasversale terminale.

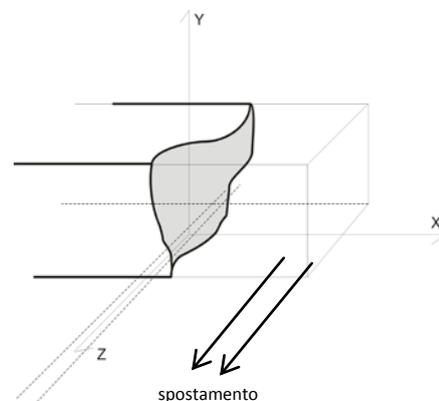


Figura 22 - Caratteristiche della traslazione trasversale terminale.

In figura precedente sono riassunte le caratteristiche principali geometriche del quadro fessurativo in forza del cedimento:

- sviluppo superficiale crescente dalla base verso l'alto;
- fessurazioni paramentali a gola sensibilmente verticali nei rami inferiori dovuto all'azione del peso del muro e invertite nei due paramenti a monte e a valle del cedimento;
- massime ampiezze fessurative in prossimità della base di fondazione che tendono a ridursi anche notevolmente salendo verso l'alto con possibilità di riscontrare la completa eliminazione dei rami di fessurazione anche nelle fasi più prossime a quella di completa rottura.

2.3.4. La traslazione verticale

Questo tipo di moto si verifica in direzione dell'asse y (altezza muro).

La traslazione verticale può provocare il movimento dell'intero corpo, e quindi, è di tipo assoluta. In tal caso non si verificano fenomeni lesionativi nella struttura.

Quando invece è coinvolta solo una parte del corpo di fabbrica, allora siamo in presenza di una traslazione verticale relativa.

Tale ultimo moto può interessare un tratto più o meno lungo del muro sia terminale che intermedio.

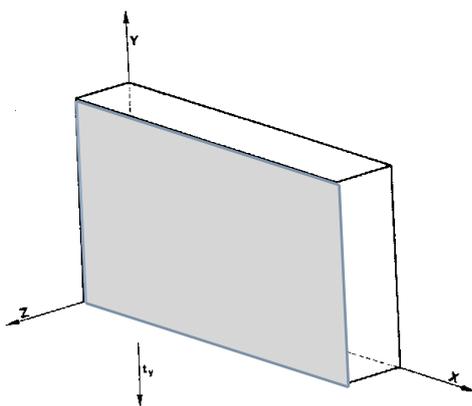


Figura 23 - Esempio di traslazione verticale assoluta.

Il cedimento di una fondazione per traslazione verticale può avvenire per le seguenti cause:

- cedimenti spontanei del terreno;
- contrazione verticale del terreno sotto carico.

I *cedimenti spontanei* del terreno sono dovuti principalmente alla presenza dell'acqua nel

sottosuolo. Una diminuzione del suo tenore igrometrico in una determinata zona, sotto la fondazione, ne provoca una contrazione e quindi un abbassamento con conseguenti dissesti nelle strutture superiori. L'ossidazione di strati torbosi o il dilavamento del sottosuolo a causa di perdita di condutture (generalmente fognature) o di falde acquifere sotterranee provoca un costante trasporto di particelle terrose con conseguente contrazione verticale e trascinamento delle membrature di fondazione.

Il prosciugamento del terreno infiltrato da acque del sottosuolo può risultare dannoso nel caso di consolidamento di edificio in corso di dissesto, in quanto la conseguente contrazione del terreno sottofondale potrebbe esaltare il fenomeno di dissesto anziché eliminarlo.

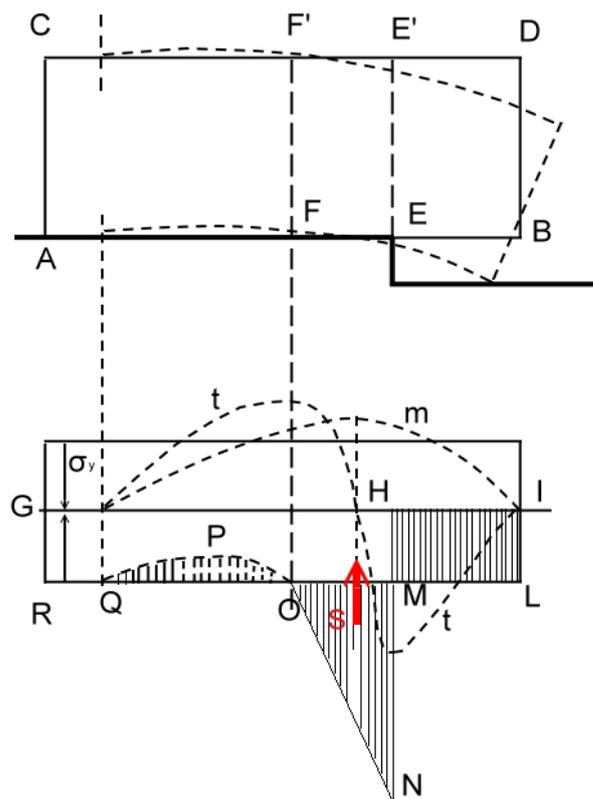


Figura 24 - Caratteristiche della traslazione verticale terminale.

Se il terreno sottofondale aveva originariamente una sufficiente resistenza, in seguito menomata da infiltrazioni di acqua, è in genere più vantaggioso eliminare le cause dell'infiltrazione, riparando le eventuali perdite di condotte od apprestando opere per un efficace deflusso e/o spiazzamento delle acque riomogeneizzando il volume di terreno sotteso alla fondazione (drenaggio, iniezioni di resine espandenti, etc.) anziché ricorrere a lavori di consolidamento tradizionale (micropali, etc.) delle strutture di fondazione che risultano sempre assai costosi.

La *contrazione verticale* del terreno sotto carico può essere invece determinata o da errori di calcolo, per cui una parte della fondazione medesima esercita sul terreno sottostante una pressione unitaria maggiore che nelle zone vicine, oppure, come più spesso accade, da sopraelevazioni o da sovraccarichi estesi ad una parte del fabbricato. In quest'ultimo caso, qualora non fosse possibile o conveniente demolire le sopraelevazioni o rimuovere i sovraccarichi, sarà necessario consolidare la fondazione in quelle zone più sollecitate, specie all'incrocio dei muri e nelle angolate dei corpi di fabbrica.

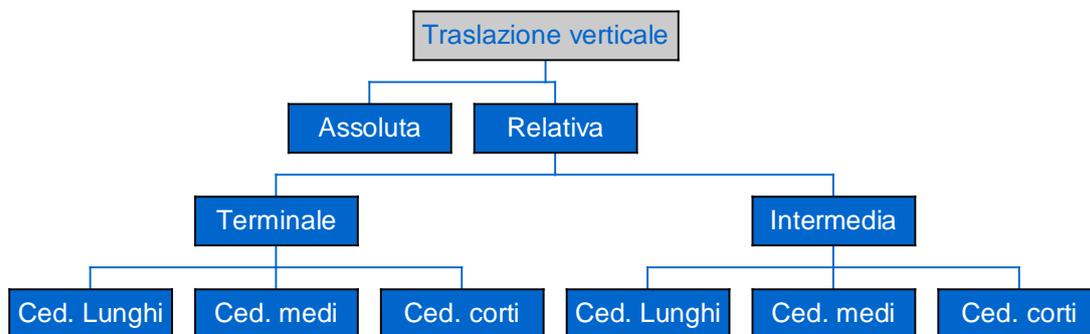


Figura 25 - Classificazione dei moti di traslazione orizzontale.

Cedimento terminale - Traslazione relativa verticale terminale

Consideriamo il muro **ABCD** di figura 24.

Esso sia caricato, su tutta la lunghezza, da un carico uniformemente ripartito. Sul piano di appoggio esso eserciterà una compressione unitaria costante σ_y , dovuta al peso proprio e al carico uniformemente ripartito.

Supponiamo che nella parte terminale EB dell'appoggio il terreno ceda. Il muro, se considerato come un solido elastico, tenderà ad abbassarsi nella parte terminale in corrispondenza del cedimento e ad innalzarsi in un tratto intermedio compreso fra i punti A ed F.

La parte EB del terreno non offrirà più alcuna reazione, mentre la parte compresa fra i punti F (asse di rotazione) ed E, subendo una deformazione assimilabile ad un triangolo, darà luogo ad un diagramma di reazione triangolare OMN.

Il diagramma rettangolare della reazione originaria GILR subirà invece un innalzamento nel tratto OPQ

conseguente alla diminuzione del carico dovuto all'innalzamento del muro.

Oltre il punto Q, e precisamente nel tratto QR, il diagramma originario non subirà alcuna variazione.

Per l'equilibrio del sistema il carico totale del muro ABCD dovrà essere equilibrato dal nuovo diagramma di G H N O P Q R il quale dovrà, a sua volta, avere la del diagramma G I L R della reazione originaria r_0 per cui le parti sottratte al diagramma reattivo originario, cioè le superfici Q P, dovranno essere uguali alla parte aggiunta OMN.

Il taglio assumerà il massimo valore negativo in corrispondenza del punto E, limite del cedimento del terreno, e il massimo valore positivo in corrispondenza del punto F, asse di rotazione dell'appoggio A B.

Il momento flettente assumerà invece il suo massimo valore (negativo) in corrispondenza della reazione S, risultante della parte di diagramma reattivo O M N.

Per cui, se le fessurazioni inizieranno per la prevalenza del momento flettente, esse compariranno sul lembo superiore del muro in corrispondenza della risultante S, con andamento iniziale verticale.

Se invece prevarranno gli sforzi di taglio le fessurazioni iniziali compariranno nella zona mediana del muro, in corrispondenza della verticale condotta per il punto E oppure per il punto F.

Nel primo caso le fessurazioni tenderanno ad inclinarsi a 45° verso destra (taglio negativo) nel secondo caso ad inclinarsi verso sinistra (taglio positivo).

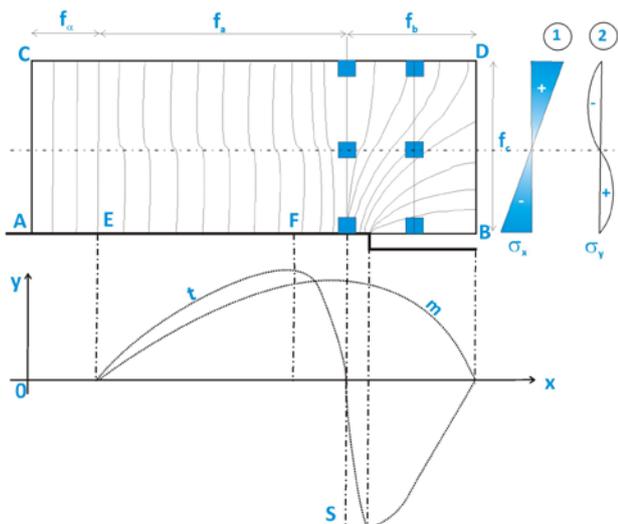


Figura 26 - Diagrammi degli sforzi taglianti 't' e dei momenti flettenti 'm' nel caso di cedimento terminale; diagramma lineare della tensione normale (1) σ_x e (2) σ_y .

La deformazione del solido murario sollecitato dalla forza t_y è quella rappresentata nella figura 27.

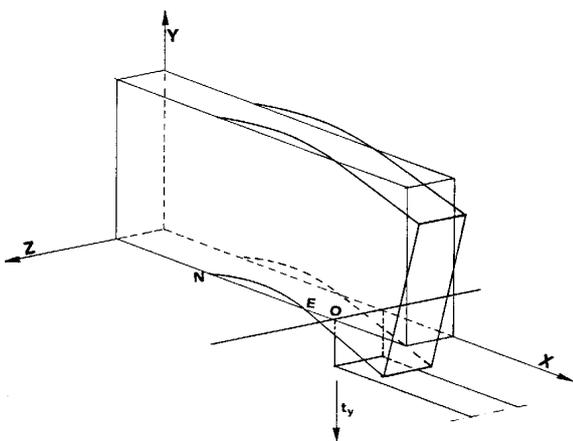


Figura 27 - Deformazione del solido murario sollecitato dalla forza t_y .

L'andamento delle isostatiche è rappresentato in figura 28:

- le isostatiche di tipo **a**, sono caratteristiche dei cedimenti lunghi;
- quelle di tipo **b** sono caratteristiche dei cedimenti medi;
- il tipo **c**, è caratteristico dei cedimenti corti;
- le isostatiche verticali sono presenti nella zona di muro lontana dal cedimento.

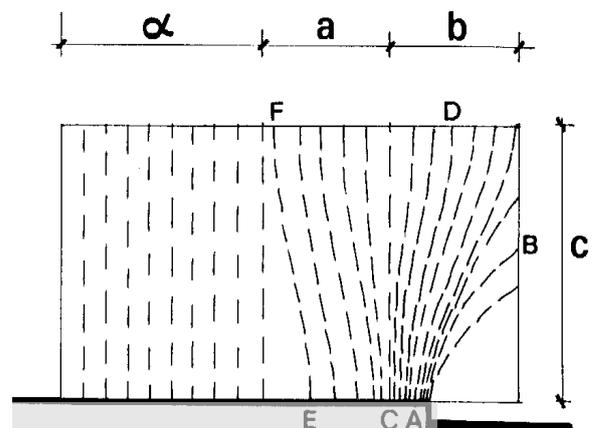


Figura 28 - Andamento delle isostatiche.

tipo α (f_α), quelle verticali, nella parte di muro non interessata dal cedimento;

tipo a (f_a), quelle interessanti la zona in posto fino alla sezione di taglio nullo, e che hanno andamento a gola rovescia con inclinazione verso la base del tronco in posto;

tipo b (f_b), quelle nella zona in cedimento, dalla sezione di taglio nullo fino all'estremo D, che hanno andamento a gola rovescia come le precedenti ma con inclinazione dalla parte del cedimento;

tipo c (f_c), quelle semiparaboliche, che partono dal bordo verticale destro del tronco in cedimento, tagliando questo orizzontalmente, e arrivano alla base della sezione al limite del cedimento.

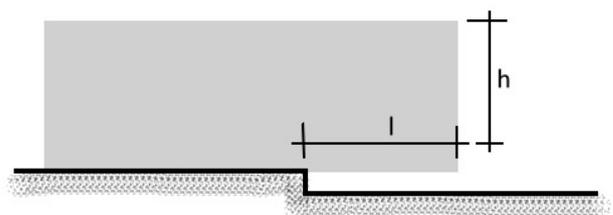


Figura 29 - Classificazione dei cedimenti terminali.

Cedimenti terminali medi, lunghi e corti

Se si considera, in via approssimativa, la parte **terminale** di muro in cedimento come una mensola di materiale omogeneo, di altezza h e di lunghezza l , secondo quanto già discusso al precedente par. 2.2.3., si definiscono come:

a) **Cedimenti medi** quelli in cui la lunghezza della parte in cedimento corrisponde alla metà dell'altezza del solido murario: $l = h/2$

b) **Cedimenti corti** quelli in cui la lunghezza della parte in cedimento è minore della metà dell'altezza del solido murario: $l < h/2$

c) **Cedimenti lunghi** quelli in cui la lunghezza della parte in cedimento è maggiore della metà dell'altezza del solido murario: $l > h/2$

Nei dissesti per cedimento terminale lungo è caratteristica la fessurazione di tipo *a*.

In quelli per cedimento terminale medio è tipica la fessurazione di tipo *b*.

In quelli per cedimento terminale corto la tipica frattura è invece quella di tipo *c*.

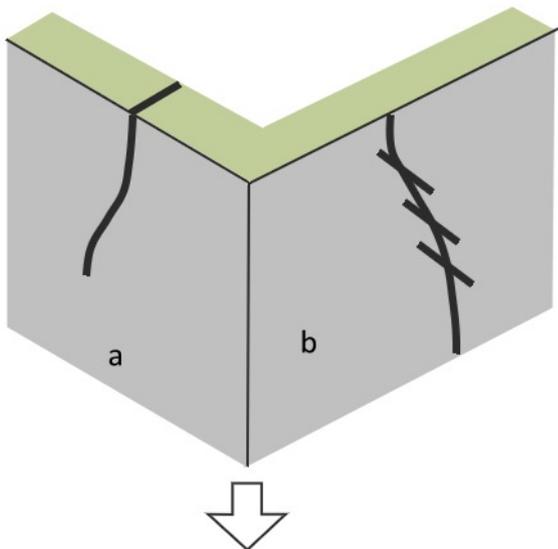


Figura 30 - Fratture per cedimento terminale tipiche in un muro ad angolo.

Nei muri che formano angolo, come gli incroci fra muri di facciata e muri interni trasversali e nelle angolate

esterne degli edifici, si riscontrano più frequentemente le fratture del tipo *b*.

Ciò è dovuto al fatto che la connessione tra i due muri che formano angolo tende ad impedire la rotazione di uno di essi rispetto all'altro, limitando o escludendo le lesioni di tipo *a* che derivano principalmente dalla rotazione, cioè dal momento flettente.

In questo modo vengono esaltati gli sforzi di taglio per cui le fratture tendono ad inclinarsi dalla parte del cedimento (tipo *b*) e possono presentarsi con l'aspetto caratteristico del tipo semplice o multiplo.

La Rotazione Secondaria

Nei cedimenti terminali, specie in quelli lunghi, il primo moto che si innesca è un movimento di rotazione della parte di solido murario interessata dal dissesto. La rotazione è detta secondaria, pur apparendo per prima, in quanto è sintomo di una traslazione verticale del terreno e non di una rotazione del medesimo.

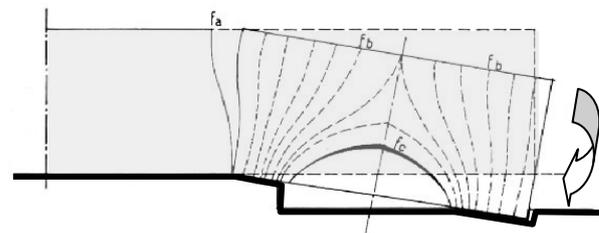


Figura 31 - Identificazione della tipologia di fessurazione (f_a , f_b , f_c) nella rotazione quale moto secondario della traslazione provocata dal trascinamento.

Nelle prime fasi del cedimento la parte muraria in dissesto è impedita a traslare verticalmente dalla reazione che oppone il terreno, nella zona vicina al cedimento stesso, e dall'attrito che la parte muraria in posto esercita su quella in dissesto, per cui, prima della fase del completo distacco della parte in cedimento compariranno delle fessurazioni di tipo *a* in un secondo tempo, specie se il cedimento è piuttosto lungo, potranno manifestarsi anche le fratture di tipo *c* paraboliche.

Quando il cedimento è lungo, il quadro iniziale delle probabili linee fessurative è quello precedentemente indicato nella figura già vista; in seguito, formandosi una zona intermedia senza appoggio, il probabile quadro fessurativo è simmetrico al precedente.

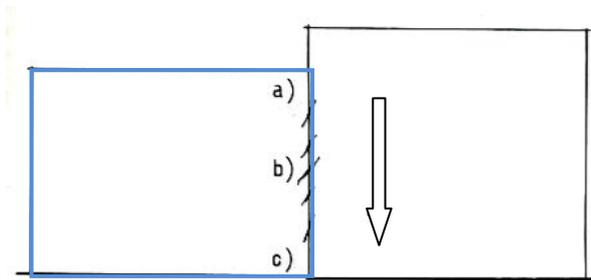


Figura 32 - Traslazione verticale assoluta di edifici contigui ad altri in posto.

Costruzioni in Aderenza

Da quanto visto in precedenza sulla distribuzione dei carichi negli strati sottofondali del terreno, risulta evidente che qualora si costruisca, in aderenza ad un vecchio edificio, uno nuovo, si verificherà una certa sovrapposizione dei relativi bulbi delle pressioni, con conseguente aggravamento delle sollecitazioni unitarie del terreno nella zona intorno alle superfici di contatto.

Fra due edifici contigui, specie se di altezza diversa o costruiti in epoche diverse, può insorgere una traslazione assoluta di uno degli edifici rispetto all'altro.

A parte le considerazioni sull'influenza fra i bulbi delle pressioni, con i possibili danni che ne conseguono, quando si verifica la traslazione assoluta suddetta, si generano lungo la verticale di congiunzione fra i due edifici contigui, delle fratture variamente inclinate dovute allo sforzo tagliante e al carico verticale.

Le fratture si manifestano ad una quota mediana della muratura in aderenza con una inclinazione dovuta al taglio, via via che si procede verso il basso le fratture avranno andamento verticale per la prevalenza della σ dovuta al carico sulle azioni di taglio (figura 32 b. c.).

In una fase successiva della traslazione le fratture elementari tenderanno a congiungersi in una spezzata lungo la verticale tra i due edifici contigui (figura 32 a.).

Da ciò deriva la necessità di non eseguire collegamenti rigidi tra una costruzione preesistente e una nuova.

È buona norma lasciare sempre dei giunti liberi tra i piani di sutura ed eseguire gli eventuali collegamenti in un secondo tempo a struttura assestata.

Cedimento Intermedio

Se in un muro senza aperture si verifica un cedimento sottofondale in una zona intermedia, il diagramma,

rettangolare, della reazione originaria r_0 si trasforma nel diagramma della reazione effettiva r_e , probabili linee fessurative sono quelle indicate nella figura 33.

La parte del solido murario interessata dal cedimento si comporterà, grosso modo, come una trave incastrata agli estremi e soggetta al peso proprio.

Anche nel caso dei cedimenti intermedi, come già visto per quelli terminali, le fessurazioni di tipo *a* sono caratteristiche dei cedimenti lunghi; quelle di tipo *b* dei cedimenti medi e quelle di tipo *c* dei cedimenti corti.

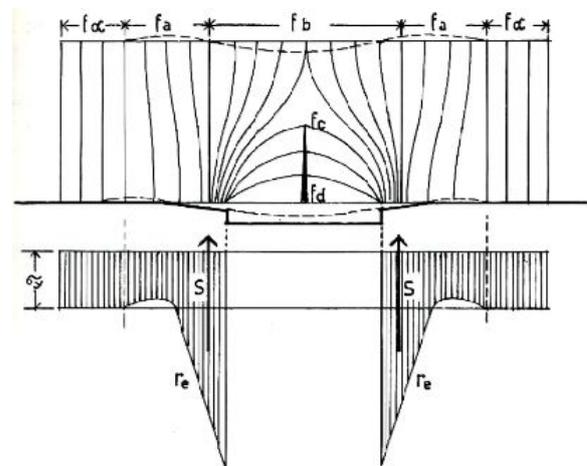


Figura 33 - Quadro completo delle famiglie fessurative nel caso di cedimento intermedio.

Quando il cedimento è decisamente lungo la prevalenza del momento flettente positivo e la possibilità di una certa rotazione del muro in corrispondenza delle sezioni *S* può provocare una frattura verticale f_d con massima ampiezza alla base.

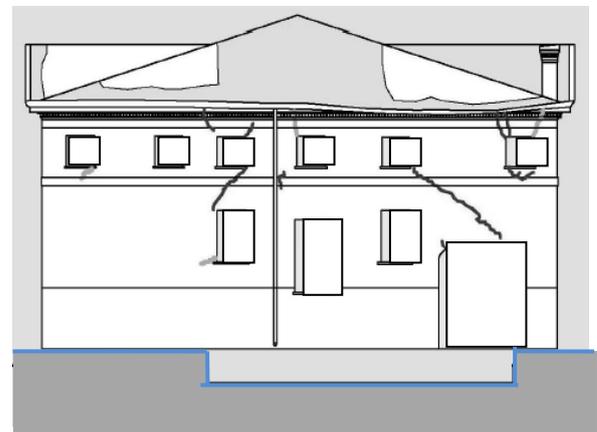


Figura 34 - Linee di fessura per cedimento intermedio.

Cedimenti intermedi: medi, lunghi e corti

Si definisce cedimento medio quello in cui il rapporto fra l'altezza h del muro e la luce della zona in cedimento è tale da rendere uguali la tensione normale massima (σ) e la tensione tangenziale (τ) dovute rispettivamente al momento flettente e allo sforzo di taglio massimi.

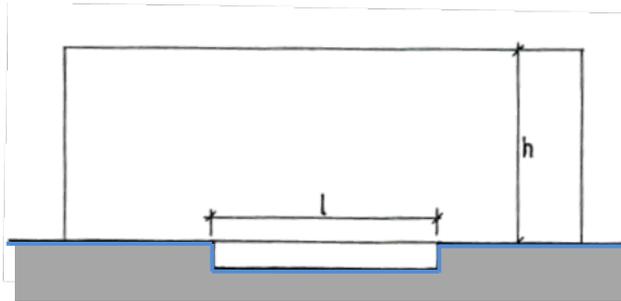


Figura 35 - Schema per diverse tipologie di cedimenti intermedi.

Consideriamo il muro della figura di spessore costante e uguale all'unità.

$$l = 3/2h$$

Il cedimento medio è quindi quello in cui la lunghezza della parte che cede è pari ad una volta e mezzo l'altezza del solido murario.

Per lunghezze maggiori di tale rapporto prevarrà il momento e quindi la σ_{max} rispetto alla τ_{max} (cedimenti lunghi). Per lunghezze minori prevarrà invece la τ_{max} sulla σ_{max} (cedimenti corti) cioè:

- se $l > 1,5 h$ = **cedimenti lunghi**
- se $l < 1,5 h$ = **cedimenti corti**

Nei primi la frattura iniziale, nelle due sezioni al limite del cedimento (frattura *tipo a*) inizierà verticalmente dall'alto.

Nei secondi, prevalendo la τ_{max} , la frattura iniziale nelle due sezioni al limite del cedimento sarà a circa metà dell'altezza ed inclinata verso i 45 gradi sul cedimento.

Nei cedimenti lunghi, una volta avvenute le fessurazioni di *tipo a* si formano nuove fessurazioni che possono essere del *tipo b* oppure del *tipo c*.

Se invece le fessurazioni iniziali di *tipo a* sono accompagnate dalla frattura verticale centrale di *tipo*

d. possono insorgere, in un secondo tempo, sia le fratture di *tipo b* che quelle di *tipo c*.

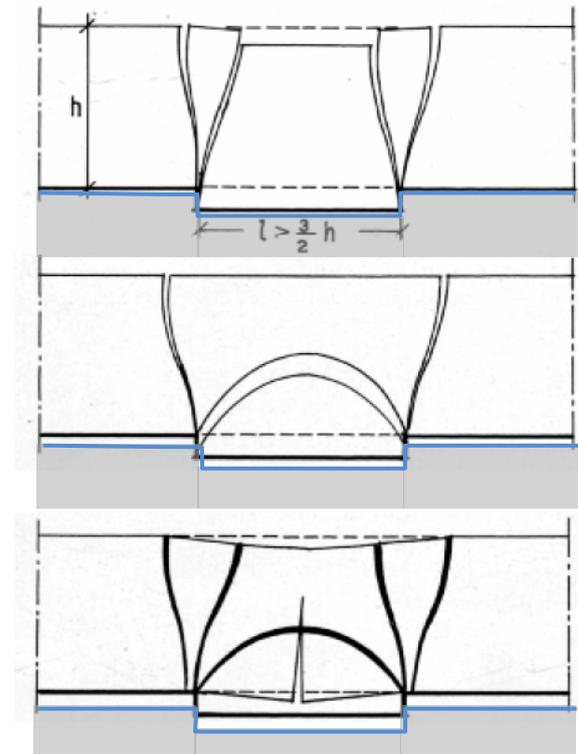


Figura 36 - Evoluzione delle fessure per cedimento intermedio lungo.

Cedimenti nei muri con aperture

Consideriamo il muro di facciata di un edificio ove il tratto terminale della sua fondazione sia soggetto ad un cedimento per traslazione verticale. La presenza delle aperture (finestre, porte, nicchie) fa sì che le linee fessurative classiche, che si stabiliscono nei muri pieni, vengano dirottate su percorsi che offrono la minore resistenza alla rottura. Uno di questi percorsi, com'è facile intuire, è quello che dalla base arriva al coronamento dell'edificio attraversando una colonna di vuoti e di parapetti.

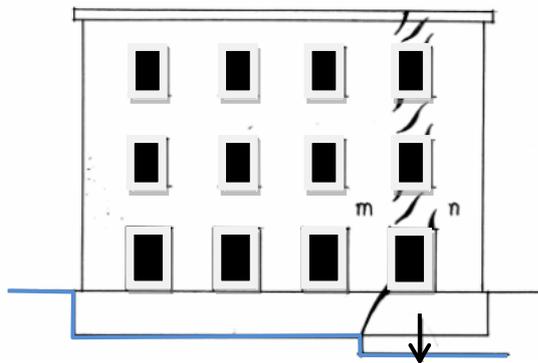


Figura 37 - Evoluzione delle fessure per cedimento terminale.

Se prendiamo in esame il nucleo murario *m-n* compreso fra due aperture, esso sarà soggetto, in dipendenza della traslazione verticale, ad una deformazione e alle sollecitazioni indicate nella figura seguente:

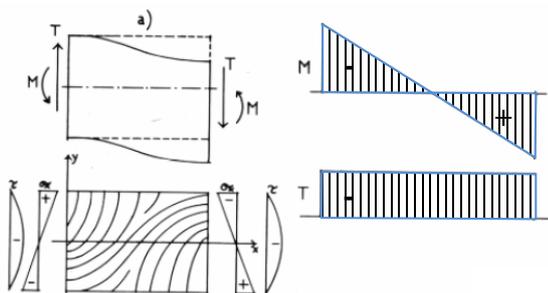


Figura 38 - Nucleo murario *m-n*: deformazioni e sollecitazioni nei muri con aperture.

Infatti le sezioni di sinistra e di destra, per la continuità con i muri *m* ed *n* tenderanno a rimanere pressoché verticali, per cui gli sforzi di taglio *T* saranno equilibrati da due momenti *M*, uguali e di segno contrario, agenti nelle due sezioni.

Il diagramma dei momenti flettenti e del taglio saranno quelli indicati nella figura 38. Il momento, massimo e negativo nella sezione di sinistra decresce fino a zero in corrispondenza della mezzeria per poi ricrescere, per valori positivi, fino al massimo sulla sezione di destra.

Il taglio si mantiene invece costante e negativo su tutta la lunghezza del tronco. Di conseguenza le tensioni normali σ , e tangenziali τ nelle due sezioni estreme saranno quelle indicate.

Nella sezione di mezzeria, annullandosi il momento flettente, si annullano anche le σ e qui il solido è

soggetto alle sole tensioni tangenziali che, essendo massime in corrispondenza del piano neutro tenderanno a rompere il nucleo murario secondo fratture inclinate a 45° .

Le tensioni normali, massime e positive rispettivamente al lembo superiore della sezione di sinistra e a quello inferiore della sezione di destra, tenderanno a rompere il solido secondo fratture verticali.

Il quadro isostatico generale sarà quindi quello indicato nella figura in cui sono indicate le isostatiche di minima; esse tagliano a 45° il piano neutro del nucleo murario. Le fratture dipendenti dalla traslazione verticale terminale saranno quelle schematicamente indicate nella figura 39.

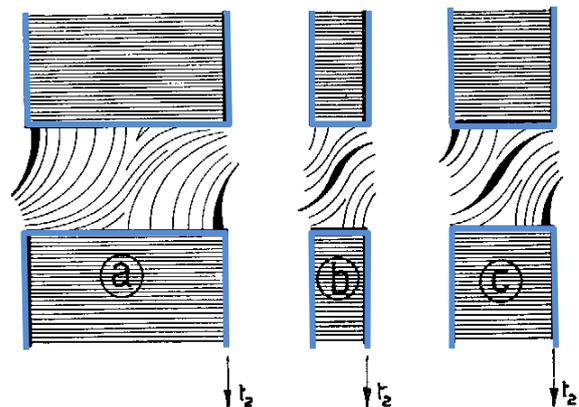


Figura 39 - Manifestazioni fessurative in funzione della larghezza della aperture e dello stato tensionale.

Quando le σ prevalgono sulle τ , il che avviene quando i nuclei murari sono lunghi (aperture larghe e vicine fra loro nel senso verticale) le fratture iniziali saranno quelle verticali agli spigoli superiore di sinistra e inferiore di destra.

Quando invece prevalgono le τ sulle σ , il che avviene nei nuclei murari corti (aperture strette e lontane fra loro nel senso verticale) le fratture iniziali saranno dovute al taglio e quindi si localizzeranno nella mezzeria, in corrispondenza del piano neutro e saranno inclinate a 45° .

Se il **cedimento è intermedio**, anziché terminale, le fratture nei nuclei murari si stabiliranno su due verticali pressappoco corrispondenti ai limiti del cedimento e l'inclinazione delle fratture sarà rivolta verso il cedimento stesso.

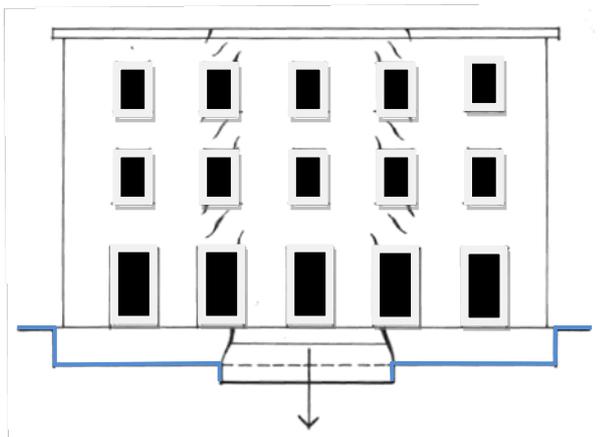


Figura 40 - Evoluzione delle fessure per cedimento intermedio.

2.3.5. Cedimenti per Rotazione

Si distinguono dai cedimenti per traslazione verticale perché il terreno sottostante, anziché cedere più o meno uniformemente sotto un tratto di fondazione, annullando in tal modo la reazione originaria per tutta la lunghezza del tratto, cede secondo una deformazione triangolare, rimanendo il punto O coincidente con l'asse di rotazione (che supponiamo ortogonale alla facciata del muro) praticamente fermo. E' il punto A, che ruota con centro O, spostato in A' (figura 41).

Per effetto della rotazione, la reazione originaria r_0 (fig. 41-a) si trasforma nella reazione effettiva r_e (fig. 41-b) in cui le aree ω_1 e ω_2 del diagramma originario uguagliano l'area del diagramma effettivo.

Per effetto del nuovo diagramma di carico (diagramma di trascinamento) si inizierà una frattura per flessione dal punto C che tenderebbe a propagarsi secondo il noto andamento a gola rovescia (vedi cedimento per traslazione verticale).

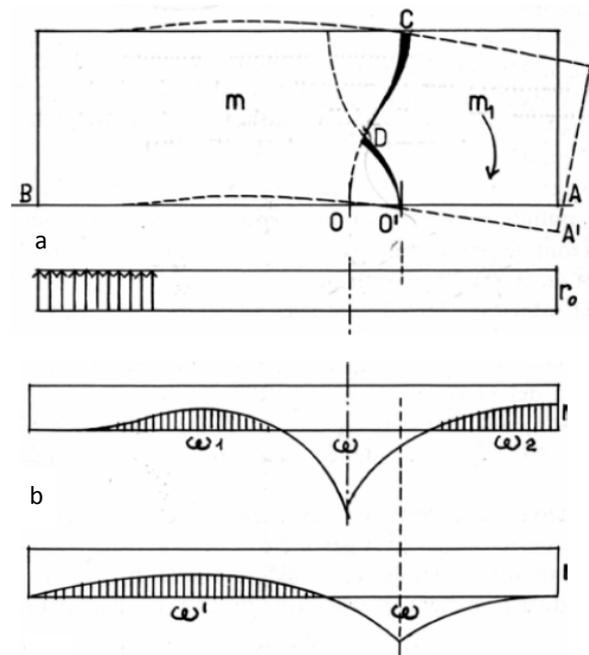


Figura 41 - Evoluzione delle fessure per cedimento da rotazione.

Quando, per il persistere del moto rotatorio, la frattura da C sia pervenuta ad un punto intermedio D, le azioni reciproche fra il tronco di muro in posto m e quello in cedimento m_1 si attenuano per il semplice fatto che i due tronchi rimangono attaccati nel solo tratto D O, di conseguenza, diminuendo il momento resistente della sezione (ridotta da O-C ad O-D) si appiattirà anche la curva elastica O-B che era generata dal momento flettente originario e il tronco di muro in posto andrà a gravare con intensità maggiore nella zona di terreno ai limiti del punto O interessando anche una porzione sottostante il tronco in cedimento.

In questa seconda fase il diagramma del trascinamento assumerà di conseguenza un andamento più appiattito ed il suo massimo valore sarà spostato verso il tronco in cedimento nei confronti del diagramma precedente.

A questo punto il muro in posto m , ancora in parte deformato, tenderà a raddrizzarsi per ristabilire l'appoggio B-O' secondo una linea retta, ciò provoca una rotazione secondaria, di senso opposto alla rotazione principale, della sezione O'-D, producendo la nuova frattura D O' con inizio dal punto D.

La frattura C-D-O, con inclinazione alla base verso la zona di muro in posto, è quindi caratteristica nei cedimenti per rotazione intorno ad un asse orizzontale trasversale come la frattura a gola rovescia lo è per i cedimenti da traslazione verticale.

Il cedimento di rotazione nei muri degli edifici

Se il muro, anziché isolato come nel caso precedente, è connesso ad angolo o a T con altro muro facente parte dello stesso edificio, il mutuo incastro fra i due muri m e m' impedisce la rotazione rigida del muro m il quale, nel suo moto di rotazione, sarà costretto ad inflettersi in maniera più o meno accentuata a seconda che l'incastro con il muro m' sia più o meno efficace.

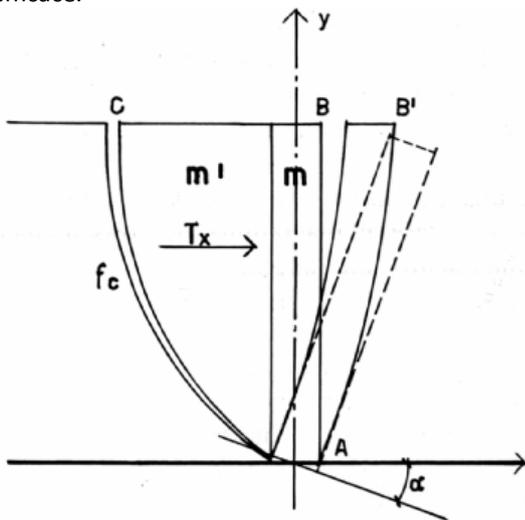


Figura 42 - Meccanismo del moto per cedimento da rotazione.

Il muro trasversale m' si comporta come se fosse appoggiato orizzontalmente sulla retta $A B$ la quale, in fase di cedimento, assumesse la configurazione deformata $A B'$ (vedi cedimento verticale terminale). In tali condizioni si genera una fessurazione f_c (fessurazione *tipo c*) che, iniziando dal punto C situato al bordo superiore del muro trasversale, si propaga fino alla base di detto muro secondo una curva omologa a quella $A B'$ assume il muro m in cedimento. Questa affinità fra profili deformati e fessurazioni è sempre verificabile, con larga approssimazione, in tutti i tipi di dissesto a condizione che le strutture murarie siano ben costruite nel senso che siano il più omogenee possibile e le varie membrature bene incastrate fra di loro altrimenti le linee fessurative deviano dalla curva omologa alla deformazione scegliendo il percorso che offre la minor resistenza. Se in effetti l'incastro fra il muro m ed il muro m' non fosse ben eseguito, il muro m , lungi dal trasportare il muro m' nel suo movimento di rotazione, si distaccerebbe da quest'ultimo lungo la linea di congiunzione (figura 43).

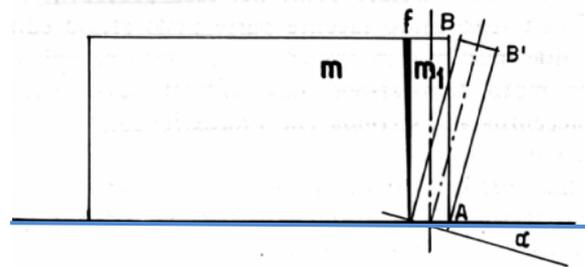


Figura 43 - Rotazione di m_1 rispetto ad m non solidale.

Nella maggior parte dei casi, comunque, la linea deformata è legata alla linea fessurativa da una affinità omologica ortogonale che ha per asse la linea originaria non deformata.

In tale affinità omologica il rapporto fra le distanze, della linea fessurativa e della linea deformata, dall'asse dell'omologia, è sempre molto superiore all'unità.

L'affinità omologica, fra linea deformata m e linea fessurativa f , comporta la proprietà che le tangenti per i punti $P-P'$; $Q-Q'$, etc. si incontrino tutte lungo l'asse $A-B$ rappresentato dalla linea originaria non deformata. I muri di facciata degli edifici sono connessi, generalmente, oltre che a muri trasversali, anche con i vari solai di piano e con la copertura. In questo caso la linea deformata $A-B'$, della figura precedente, si trasformerà in una specie di sinusoide sempre più smorzata dalla base alla copertura.

La linea fessurativa f , omologa alla deformata $A-B'$ nel muro trasversale m' , risulta anch'essa di tipo sinusoidale ma con distanze dall'asse $A-B$ maggiori di quelle della linea deformata $A-B'$. Le tangenti passanti per i punti corrispondenti $P-P'$; $Q-Q'$, ecc. alle due linee (deformata $A-B'$ e fessurativa f) si intersecano lungo l'asse $A-B$ del muro originario.

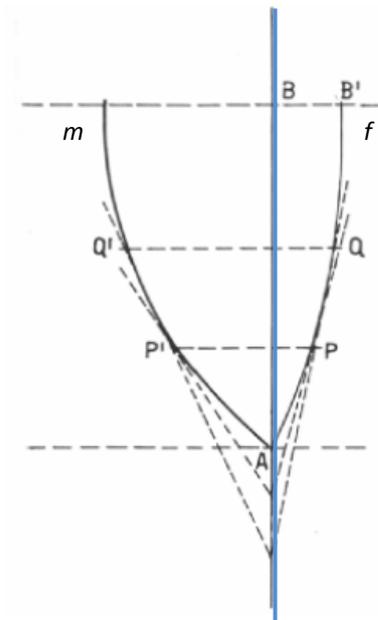


Figura 44 - Affinità tra linea deformata m e linea fessurativa f .

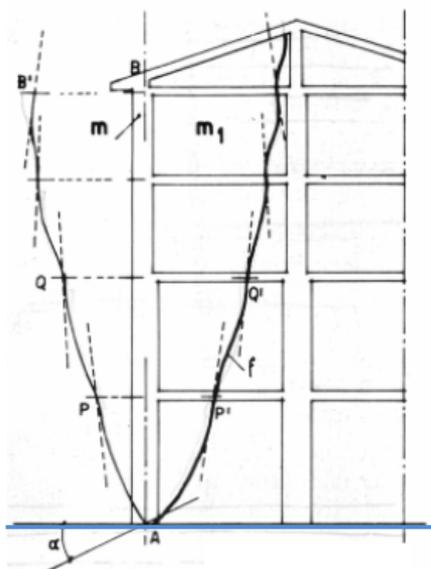


Figura 45 - Linea deformata m e linea fessurativa f in muri privi di aperture.

Se nel muro trasversale vi sono delle aperture (porte o finestre) come più di frequente si verifica, la linea fessurativa non segue più il suo andamento naturale ma sceglie il percorso di minor resistenza che è quello delle architravi.

Essa si divide in tal modo in tante fratture, ubicate nelle zone murarie di architrave, aventi una forma assimilabile a quella della gola rovescia. La frattura P'-

Q' è ora concentrata tutta nell'altezza dell'architrave, ne conserva il medesimo andamento, ed ha più o meno la stessa ampiezza in proiezione orizzontale. Con la deformazione della parete A-B in A-B' anche i vani delle porte si deformano, per tale motivo uno dei sintomi del dissesto è quello della difficoltà della chiusura degli infissi ai varchi.

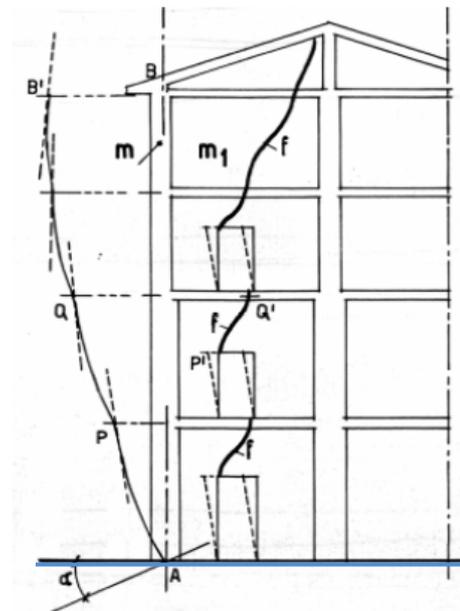


Figura 46 - Linea deformata m e linea fessurativa f in muri con aperture.

Appendice

A.1. Componenti di cedimento delle fondazioni

I cedimenti delle fondazioni superficiali, spostamenti verticali del piano di posa, costituiscono il risultato delle deformazioni verticali del terreno sottostante la fondazione. I cedimenti fondali sono tra le maggiori, e più diffuse, cause di dissesto statico o di perdita di funzionalità di un'opera. Tra le cause di tali cedimenti, di varia natura, quelle più ricorrenti (Cestelli Guidi, 1975) sono scarsa o errata conoscenza dei suoli e sottodimensionamento delle fondazioni.

Al fine di rendere comprensibile il fenomeno, si ritiene utile esporre i valori ammissibili dei diversi parametri che definiscono cedimenti assoluti e differenziali, riferiti e misurati, come consuetudine, a specifiche variabili, illustrate nella tabella seguente (Terzaghi & Peck, Burland e Wroth, 1974 et al.), in cui vengono rappresentati i parametri usati per esprimere

cedimenti assoluti e differenziali. I punti A, B, C e D possono sia rappresentare i plinti isolati di un sistema di fondazioni superficiali, ma anche i punti di un muro, di una trave, d'una fondazione a platea.

Assumendo la precedente codifica quale riferimento, i parametri indicatori significativi risultano:

S, W = cedimento del punto i ($i = A, B, C, D$)

ω = rotazione rigida (pendenza sull'orizzontale della congiungente due punti consecutivi)

$\delta S, \Delta S$ = cedimento differenziale, differenza fra i cedimenti di due punti

θ = rotazione relativa o distorsione angolare, rotazione della congiungente due punti rispetto alla retta congiungente le estremità.

α = deformazione angolare (negativa per concavità verso il basso – hogging, positiva per concavità verso l'alto – sagging), ossia la rotazione totale in un punto

Δ = inflessione

Δ/L = rapporto di inflessione (curvatura)

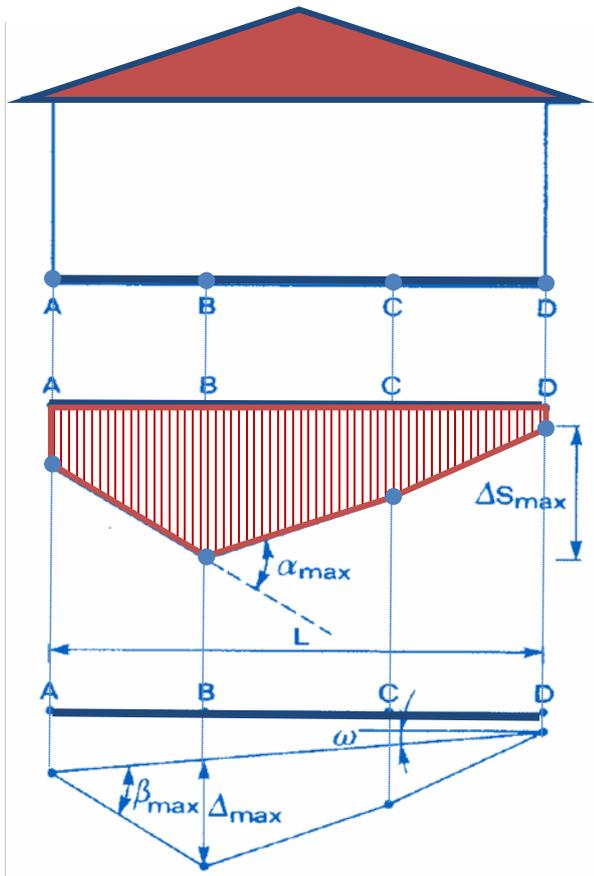


Figura 47 - Componenti di cedimento delle fondazioni.

Tabella 1. Valori ammissibili di alcuni parametri di deformazione delle strutture [2] [3]

Autori	Rotazione relativa β				Cedimento differenziale $\delta S, \Delta S$			Cedimento massimo S_{max}		Rapporto di inflessione Δ/L (curvatura)	
	fondazioni isolate	piastre	telai aperti	telai tamponati	muratura portante	fondazioni isolate	piastre	fondazioni isolate	piastre	sagging	hogging
1948 Terzaghi e Peck	-	-	-	-	-	20 mm	20 mm	25 mm	50 mm	-	-
1956 Peterhof	-	-	1/250	1/500	1/1000					muratura portante 1/2000 - 1/2500	
1956 Skempton McDonald	1/300	1/300	-	-	-	argilla 45 mm sabbia 30 mm		75 mm 50 mm	75 - 125 mm 50 - 75 mm	-	-
1957 Polshin e Tokar	-	-	argilla 1/200 sabbia 1/200	argilla 1/500 sabbia 1/500	-	-	-	-	-	ecrit = 0.05% Muratura portante argilla L/H < 5 1/2500 ; L/H > 5 1/1400 sabbia L/H < 5 1/3500 ; L/H > 5 1/2000	
Sowers (1962)								Fattore di limitazione	Collegamento a reti di servizi 15÷30 cm Accessibilità 30÷60 cm Probabilità di cedimenti differenziali in: a) murature portanti 2,5÷5 cm b) strutture intelaiate 5÷10 cm c) ciminiera, silos 7,5÷30 cm	-	-
1963 Bjerrum	macchinari sensibili 1/750 limite di sicurezza per non avere fessurazioni 1/500 prima fessuraz. per pann. murari 1/300 fessurazioni considerevoli 1/150 rischio di danni strutturali 1/150 limite di sicurezza per pann. In muratura di mattoni 1/150				-	-	-		-	-	-
1974 Burland e Wroth (per ecrit = 0.075%)	-	-	1/500	1/500	-	-	-	-	-	L/H = 1 1/2500 L/H = 5 1/1250	L/H = 1 1/5000 L/H = 5 1/2500
1974 Grant, Christian Vanmarck	1/3000 ma la rotazione relativa totale puo' superare questo valore senza danni locali				argilla 56 mm sabbia 30 mm	-	-	-	-	-	-
1988 Rankine	Rischio: trascurabile < 1/500 Lieve 1/500 - 1/200 Moderato 1/200 - 1/50 elevato >1/50				-	-	-	< 10 mm 10 - 50 mm 50 - 75 mm > 75 mm	-	-	

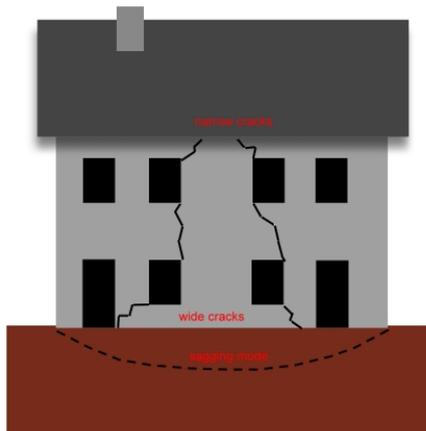


Figura 48 - Sagging.

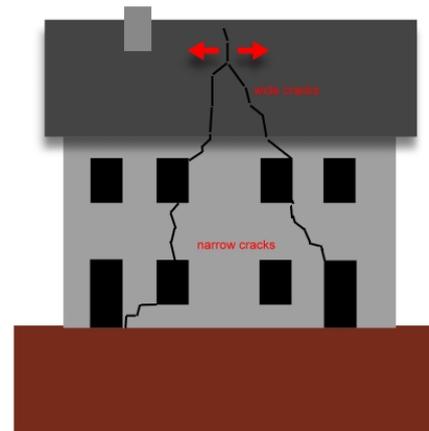


Figura 49 - Hogging.

Tabella 2. Valori ammissibili riferiti alle tipologie strutturali e di danno (Holtz, 1991) [21]

Tipo di movimento	Fattore di limitazione		Valore ammissibile
Cedimento (cm)	Collegamento a reti di servizi		15 ÷ 30
	Accessibilità		30 ÷ 60
	Probabilità di cedimenti differenziali	<i>Murature portanti</i> <i>Strutture intelaiate</i> <i>Ciminiere, silos</i>	2.5 ÷ 5 5 ÷ 10 7.5 ÷ 30
Curvatura o Rapporto di Inflessione Δ/L	Stabilità al ribaltamento		Da verificare
	Rotazione di ciminiere e torri		$\delta S/H \leq 0.04$
	Drenaggio di superfici pavimentate		0.01 ÷ 0.02
Rotazione relativa β	Operatività macchine	<i>Macchine tessili</i> <i>Turbogeneratori</i> <i>Gru a ponte</i>	0.003 0.0002 0.003
	Murature portanti multipiano		0.0005 ÷ 0.001
	Murature portanti ad un piano		0.001 ÷ 0.02
Rotazione relativa β	Lesione intonaci		0.001
	Telai in c. a.		0.0025 ÷ 0.004
	Pareti di strutture a telaio in c.a.		0.003
	Telai in acciaio		0.002
	Strutture semplici di acciaio		0.005

L = distanza tra pilastri adiacenti, H = altezza di ciminiere e torri

A.2. Conclusioni:

Risultano ammissibili cedimenti maggiori su terreni argillosi che avvengono più gradualmente nel tempo, rispetto a quelli su terreni sabbiosi, permettendo alla struttura di adeguarsi. Inoltre gli edifici a telaio

sopportano, meglio di edifici a muratura portante, cedimenti differenziali, per la loro minore fragilità.

I muri con significative funzioni portanti sopportano meglio deformazioni angolari con concavità verso l'alto piuttosto che verso il basso e le strutture lunghe sopportano meglio le inflessioni relative.

Le deformazioni verticali sopra esposte, conseguenze di un'alterazione dello stato tensionale, possono essere l'effetto del carico trasmesso dalla fondazione stessa o da fondazioni vicine, ma anche di una variazione delle pressioni interstiziali, per esempio a causa di un abbassamento o innalzamento della falda. Per quanto riguarda il carico trasmesso dalla fondazione, la stima dei cedimenti attesi è necessaria, al fine di poterne valutare l'ammissibilità in esercizio. Per poter stimare i cedimenti occorre conoscere, nel volume significativo del sottosuolo, stratigrafie, stato tensionale, la relazione tensioni-deformazioni- tempo, per tutti i terreni interessati.

Il volume significativo rappresenta lo strato di terreno in grado di subire modifiche tensionali per effetto dei carichi deformativi trasmessi dall'opera.

Nelle figure seguenti se ne fornisce indicazione nei casi più generali.

Fondazioni superficiali: $1,5 - 2B$ dove B è la dimensione maggiore della fondazione intesa come larghezza della fondazione nel caso di fondazione isolata o, laddove la distanza sia tale da creare sovrapposizioni tra i bulbi di pressione, si deve considerare la larghezza dell'edificio.

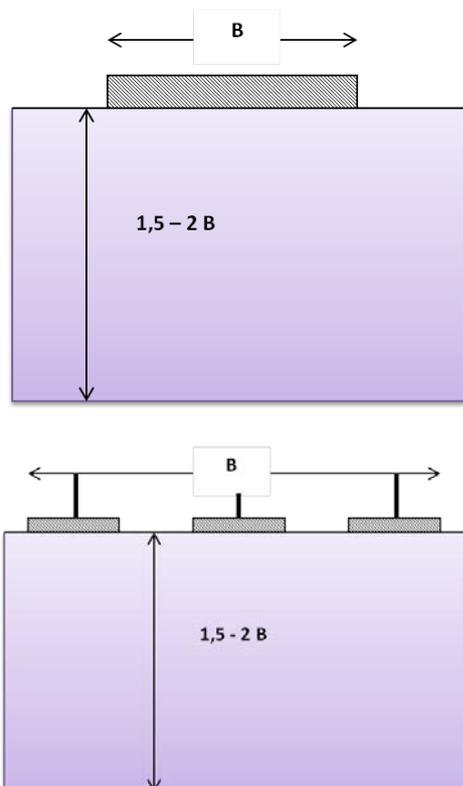


Figura 50 - Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di fondazioni superficiali.

Fondazioni su pali: bisogna far riferimento alla fondazione equivalente

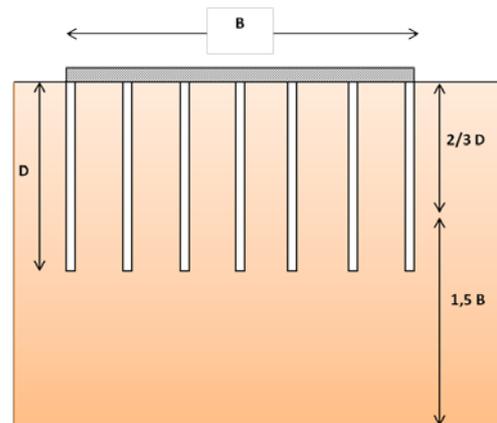


Figura 51 - Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di fondazioni su pali.

Diaframmi e muri di sostegno: la profondità è compresa tra 0,75 e 1,5 volte l'altezza libera della struttura.

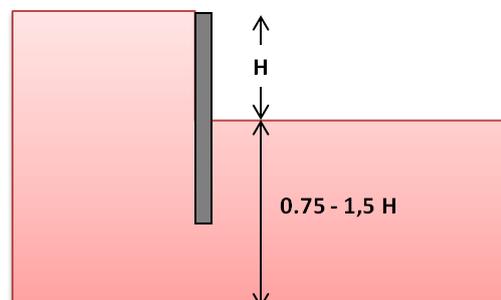


Figura 52 - Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di diaframmi e muri di sostegno.

Argini e dighe in terra: fino a metà della larghezza dell'opera.

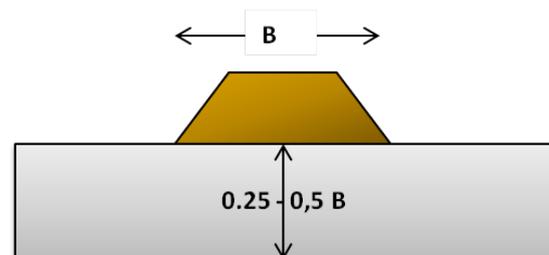


Figura 53 - Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di argini e dighe in terra.

L'estensione del volume significativo può essere influenzato dalle opere esistenti al contorno e nell'intorno, da cedimenti in atto o dalla presenza di falde. Per le opere di stabilità dei pendii o dei fronti di scavi, il volume significativo da prendere in considerazione va sempre al di sotto dei piani di scorrimenti più probabili, al fine di avere la certezza di prendere in esame anche i terreni nelle condizioni più sfavorevoli. Come per altri problemi geotecnici, la cui complessità rende complessa una soluzione 'in forma chiusa', anche la stima dei cedimenti fondali viene affrontata 'per parti', con il ricorso a modellazioni parziali, talvolta empiriche, ma accurate quanto serve, per fornire una risposta quantitativa affidabile ad ogni passo del procedimento. E' essenziale avere il senso della complessità del problema geotecnico e geofisico, unitamente alla consapevolezza dei limiti dei modelli e degli schemi adottati.

Il calcolo dei cedimenti con i metodi classici della geotecnica si sviluppa in varie fasi che si possono così riassumere:

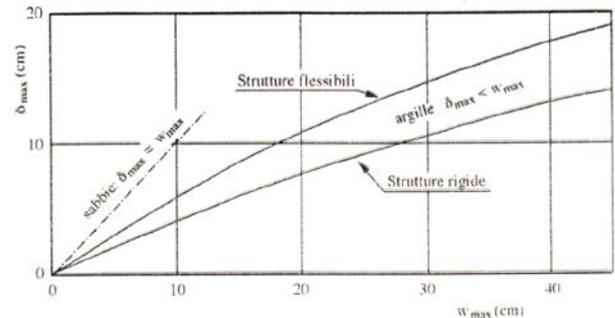
1. determinazione sulla base delle indagini eseguite, del profilo geotecnico del terreno;
2. calcolo degli incrementi di tensione verticale nel terreno di fondazione, incrementi determinati dai carichi agenti sul piano di fondazione;
3. sulla base dei risultati della indagine geotecnica, scelta delle caratteristiche tensioni-deformazioni-tempo rappresentative dei vari strati di terreno interessati dalle variazioni di tensioni verticali e calcolo delle tensioni verticali citostatiche;
4. sulla base delle scelte e delle determinazioni precedentemente eseguite, si calcolano le deformazioni dei vari strati di terreno;
5. per i terreni coesivi, a bassa permeabilità, si valuta l'andamento nel tempo dei cedimenti.

Quando si hanno incrementi delle tensioni verticali, si hanno anche deformazioni verticali che assumono valori significativi in relazione al tipo di terreno e alle esigenze dell'opera che si vuole costruire.

In genere si hanno valori rilevanti del cedimento, per il campo di tensioni più frequentemente trasmesse al terreno, quando si interessano strati di argilla normalmente consolidata o leggermente sovraconsolidata, mentre quando si interessano strati di argilla fortemente sovraconsolidata, o di sabbia e di ghiaia, si hanno cedimenti limitati.

Tavole di valutazione empirica dei cedimenti differenziali

Correlazioni empiriche tra δS_{max} e S_{max} [W_{max}] (Bjerrum, 1963)



	Deformabilità	Uniformità depositi
Sabbie	ridotta $\rightarrow S_{max} \leq 10$ cm	ridotta $\rightarrow \delta S_{max} \approx S_{max}$
Argille	elevata $\rightarrow S_{max} \leq 50$ cm	elevata $\rightarrow \delta S_{max} < S_{max}$

Figura 54 - Valutazione empirica dei cedimenti in funzione della litologia secondo Bjerrum, 1963.

Correlazioni empiriche tra β_{max} e δS_{max} [W_{max}] (Grant et al, 1974)

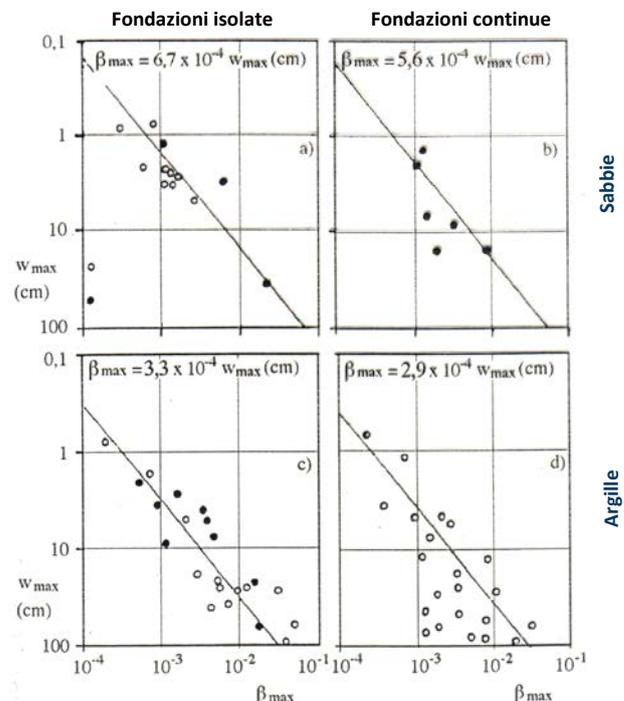


Figura 55 - Valutazione empirica dei cedimenti in funzione della tipologia di fondazione secondo Bjerrum, 1963.

Bibliografia di riferimento

- [1] Antonucci, R., 2005, "Restauro e recupero degli edifici a struttura muraria. analisi e interventi sul costruito storico", Maggioli Editore.
- [2] Anzani, A. Dispense del Corso di Diagnostica e Conservazione - Dissesti statici degli edifici - Politecnico di MILANO.
- [3] Anzani, A. Dispense del Laboratorio di Restauro e Consolidamento, I terreni e le fondazioni - Politecnico di MILANO.
- [4] Borri, A., Corradi, M., 2011, "Tecniche sperimentali per il monitoraggio degli edifici in zona sismica", condotta presso il Dipartimento Strutture della Facoltà di Ingegneria di Perugia www.estensimetri.it
- [5] Braja, 2006, Principles of Geotechnical Engineering, 5th ed.
- [6] Cestelli Guidi C., 1975, Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni, U. Hoepli Editore.
- [7] Cicchiello P., aprile-giugno 2010, CT – Consulente Tecnico n. 2, - I cedimenti nelle fondazioni. Spunti di approfondimento da un'indagine peritale.
- [8] Cicchiello P., 2010, Diagnostica Strutturale, Maggioli Editore, S.Arcangelo di Romagna.
- [9] Cusmano G., Gennaio/Febbraio 2004, 'Fessure murarie: che fare?' - Rivista SPECIALIZZATA 131, BE.MA editrice – Milano.
- [10] Defez, A., 1983, "Il consolidamento degli edifici", Liguori Editore.
- [11] Di Francesco R., 2008, Lesioni degli edifici, Applicazione di geotecnica e geofisica nell'analisi dei cedimenti delle fondazioni, U. Hoepli Editore, Milano
- [12] Hearn E.J., 1997, Mechanics of materials 2, 3rd ed, Butterworth Heinemann.
- [13] Hicks, 2004, Standard Handbook Of Engineering Calculations, 4th ed.
- [14] Lancellotta, R. & Calavera, J. (1999). Fondazioni. Mc Graw - Hill. pp. 1 - 611.
- [15] Lemaitre D., 2005, Engineering Damage Mechanics – Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures.
- [16] Mastrodicasa, S., 1993, "Dissesti statici delle strutture murarie", Hoelpi Editore.
- [17] McLean A.C., Gribble, C.D., 1983, Geology for civil engineers, E&FN Spon.
- [18] Ministero dell'Interno-Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco 'COSTRUZIONI E DISSESTI STATICI' Servizio Tecnico Centrale, Ispettorato per la formazione professionale corsi multimediali.
- [19] Stochino M., A.A. 2008/2009 Dispense n.7-9 Laboratorio di Restauro I semestre. Docente: Facoltà di Architettura Università di Cagliari.

[20] Terzaghi, K., Peck, R.b., 200', GEOTECNICA, Ed. UTET.

[21] VV. F. Bergamo, 2011,

www.vigilidelfuoco.bergamo.it/...strutture.../

[22] Vassallo, R., 2010, Dispense Geotecnica, Geologia Applicata - Università degli Studi della Basilicata - Facoltà di Ingegneria; Dipartimento di Strutture.

[23] C. Viggiani (1999). Fondazioni. Hevelius Edizioni, pp. 1 – 565.

[24] Yamaguchi E., 1999, Structural Engineering Handbook – Basic Theory Of Plates And Elastic Stability.

Immagini nel quaderno e riferimenti bibliografici [...]:

Figura 1. Linee isostatiche su corpo incastrato caricato in punta.

Figura 2. Cigli fessurativi di una frattura.

Figura 3. Direttrice fessurativa a ramo unico.

Figura 4. Direttrice fessurativa a rami multipli.

Figura 5. Direttrice fessurativa a ramo unico fuori le isostatiche di minimo.

Figura 6. Quadro isostatico in muro privo di aperture.

Figura 7. Andamento delle linee isostatiche in muro con presenza di aperture.

Figura 8. Bulbo caratteristico delle sollecitazioni in sottofondazione (Kögler e Scheidig, 1933-34).

Figura 9. Diagramma relativo ad una fondazione di tipo lineare con carico unitario p_0 uniformemente distribuito (Kögler e Scheidig, 1933-34). [19]

Figura 10. Azioni fisiche sull'edificio: traslazione e rotazione.

Figura 11. Classificazione dei cedimenti intermedi.

Figura 12. Rappresentazione grafica cedimento intermedio lungo

Figura 13. Rappresentazione grafica cedimento intermedio medio

Figura 14. Rappresentazione grafica cedimento intermedio corto

Figura 15. Rappresentazione grafica cedimento terminale lungo

Figura 16. Rappresentazione grafica cedimento terminale medio.

Figura 17. Rappresentazione grafica cedimento terminale corto.

Figura 18. Diagramma del trascinarsi operato dal cedimento verticale

Figura 19. Manifestazioni fessurative: la traslazione longitudinale.

Figura 20. Classificazione dei moti di traslazione orizzontale. [21]

Figura 21. Manifestazioni fessurative: la traslazione trasversale terminale. [21]

Figura 22. Caratteristiche della traslazione trasversale terminale.

Figura 23. Esempio di traslazione verticale assoluta.

Figura 24. Caratteristiche della traslazione relativa verticale terminale.

Figura 25. Classificazione dei moti di traslazione orizzontale. [21]

Figura 26. Diagrammi degli sforzi taglianti 't' e dei momenti flettenti 'm' nel caso di cedimento terminale; diagramma lineare della tensione normale (1) σ_x e (2) σ_y .

Figura 27. Deformazione del solido murario sollecitato dalla forza t_y . [21]

Figura 28. Andamento delle isostatiche. [21]

Figura 29. Classificazione dei cedimenti terminali.

Figura 30. Fratture per cedimento terminale tipiche in un muro ad angolo.

Figura 31. Identificazione della tipologia di fessurazione (f_a , f_r , f_c) nella rotazione quale moto secondario della traslazione provocata dal trascinamento.

Figura 32. Traslazione verticale assoluta di edifici contigui ad altri in posto.

Figura 33. Quadro completo delle famiglie fessurative nel caso di cedimento intermedio. [19]

Figura 34. Linee di fessura per cedimento intermedio.

Figura 35. Schema per diverse tipologie di cedimenti intermedi.

Figura 36. Evoluzione delle fessure per cedimento intermedio lungo.

Figura 37. Evoluzione delle fessure per cedimento terminale.

Figura 38. Nucleo murario m - n : deformazioni e sollecitazioni nei muri con aperture.

Figura 39. Manifestazioni fessurative in funzione della larghezza della aperture e dello stato tensionale. [21]

Figura 40. Evoluzione delle fessure per cedimento intermedio.

Figura 41. Evoluzione delle fessure per cedimento da rotazione. [19]

Figura 42. Meccanismo del moto per cedimento da rotazione. [19]

Figura 43. Rotazione di m_1 rispetto ad m non solidale. [19]

Figura 44. Affinità tra linea deformata m e linea fessurativa f . [19]

Figura 45. Linea deformata m e linea fessurativa f in muri privi di aperture. [19]

Figura 46. Linea deformata m e linea fessurativa f in muri con aperture. [19]

Figura 47. Componenti di cedimento delle fondazioni.

Figura 48. Sagging.

Figura 49. Hogging.

Figura 50. Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di fondazioni superficiali. [23]

Figura 51. Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di fondazioni su pali. [23]

Figura 52. Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di diaframmi e muri di sostegno. [23]

Figura 53. Identificazione della profondità di Volume Significativo nel caso di argini e dighe in terra. [23]

Figura 54. Valutazione empirica dei cedimenti in funzione della litologia secondo *Bjerrum, 1963*. [22]

Figura 55. Valutazione empirica dei cedimenti in funzione della tipologia di fondazione secondo *Bjerrum, 1963*. [24]

Gli schemi di evoluzione delle fessure per diverse tipologie di cedimento, di cui al capitolo 2.3, hanno il solo scopo di sintetizzare ed esemplificare graficamente i processi di cedimento ad essi correlati.



II^ Edizione Agosto 2011

Copyright Geosec © All Right Reserved

GEOSEC®

Via Giuseppe Di Vittorio, 41/B
Lemignano di Collecchio 43044 (PR)

tel. 0039 0521 339323

fax 0039 0521 804772

e-mail: info@geosec.it

www.geosecgroup.com

Note:



SEDE: Via Giuseppe Di Vittorio 41/B
Lemignano di Collecchio 43044 (Parma)

Tel: 0521 339323 - Fax: 0521 804772
info@geosec.it



www.geosec.it