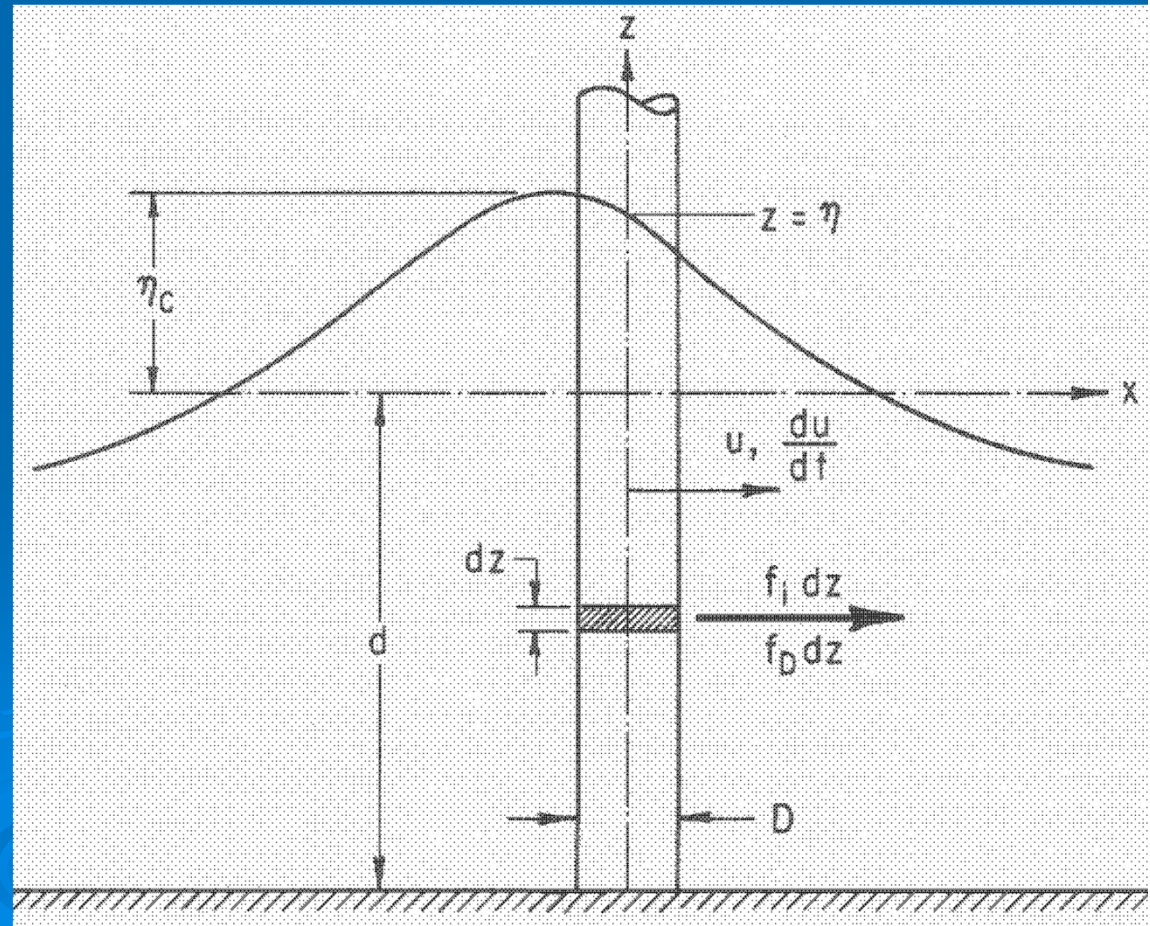


PALI

Si distinguono:

1. pali di piccolo diametro se $D/L < 0,05$
2. pali di grande diametro se $D/L > 0,05$

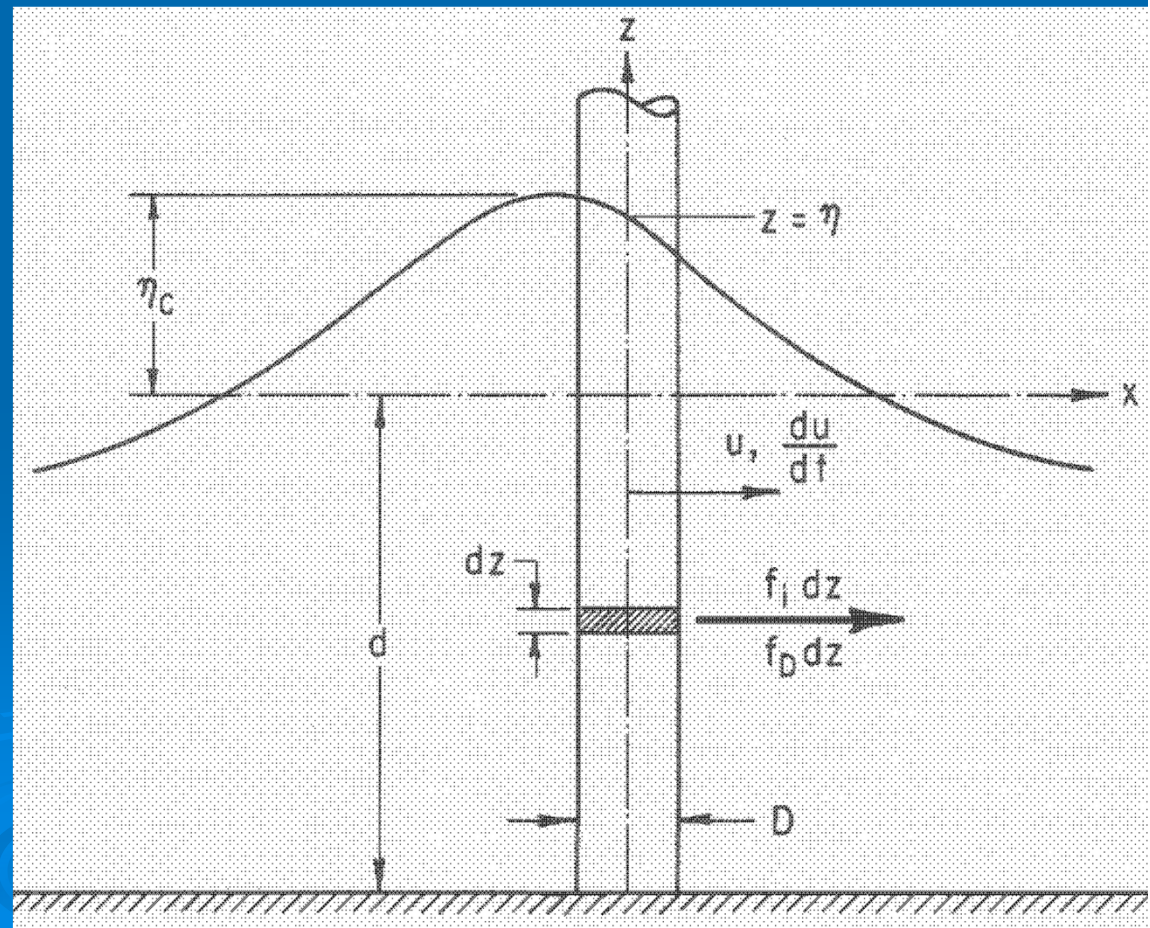
Nel caso 1 il palo non modifica il moto ondoso, mentre nel caso 2 il moto ondoso è modificato dal palo.



PALI

Nel caso di pali di grande diametro bisogna studiare il campo di diffrazione indotto dal palo (esiste la soluzione analitica).

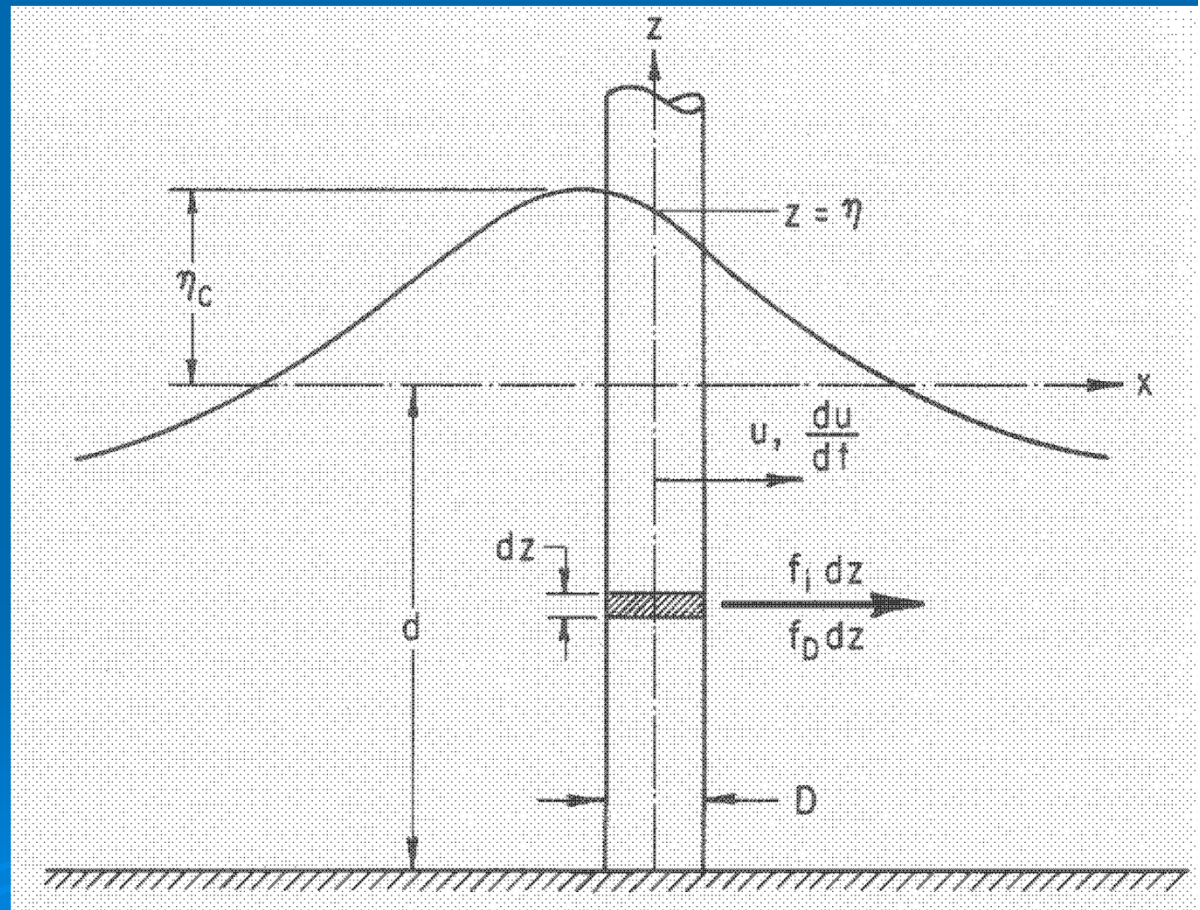
Di seguito viene trattato il caso di pali di piccolo diametro.



PALI

Le forze causate dal moto ondoso che agiscono sul palo sono correlabili ai seguenti parametri adimensionali:

- H/gT^2 = ripidità dell'onda;
- d/gT^2 = profondità adim.;
- D/L = rapp. tra il diametro del palo e la lunghezza d'onda;
- ε/D = scabrezza relativa del palo;
- $H D/T \nu$ = una forma del numero di Reynolds;



PALI onde non frangenti

In analogia al meccanismo mediante il quale le azioni di un fluido agiscono su un corpo in un flusso unidirezionale, Morison et al. (1950) suggerirono che la forza unitaria per unità di lunghezza di palo sia esprimibile con:

$$f = f_i + f_D = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D u |u|$$

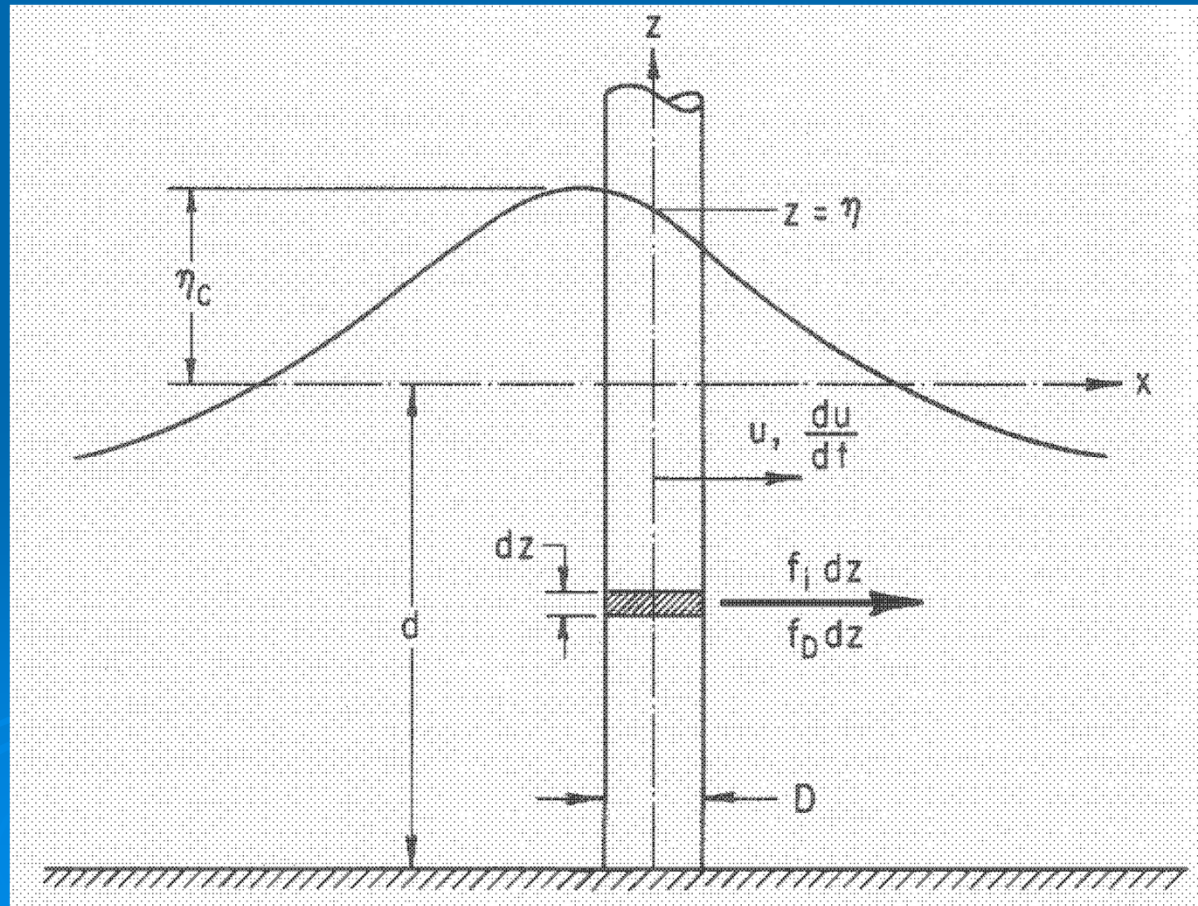
f_i = forza di inerzia per unità di lunghezza del palo;

f_D = forza di trascinamento (drag) per un. di lung. palo;

Coefficienti idodinamici:

C_D = coefficiente di “drag”;

C_M = coefficiente di “inerzia” o di “massa”.



PALI onde non frangenti

$$f = f_i + f_D = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D u |u|$$

f_i dipende dall'accelerazione delle particelle idriche e dalla massa del palo;

f_D dipende dalla velocità al quadrato delle particelle idriche e dalla superficie del di palo che è investita dal flusso. Il modulo della velocità serve a conservare il segno della forza che inverte di direzione con la periodicità delle onde

f_i e f_D sono sfasate nel tempo e quindi la forza massima sul palo si raggiunge in un istante diverso rispetto a quelli in cui si raggiungono i massimi della forza di inerzia e della forza di drag.

Ovviamente si tratta di forze periodiche di periodo pari a quello delle onde.

SI OSSERVI CHE L'ESPRIMERE LA FORZA TOTALE IN FUNZIONE DELLA FORZA DI INERZIA E DELLA FORZA DI DRAG (TEORIA DI MORISON) E' UNA ASSUNZIONE CHE E' GIUSTIFICATA SOLO DAL FATTO CHE PORTA AD UNA PREVISIONE DELLE FORZE SUFFICIENTEMENTE ACCURATA.

PALI onde non frangenti

$$f = f_i + f_D = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D u |u|$$

I coefficienti C_M e C_D sono dedotti sperimentalmente.

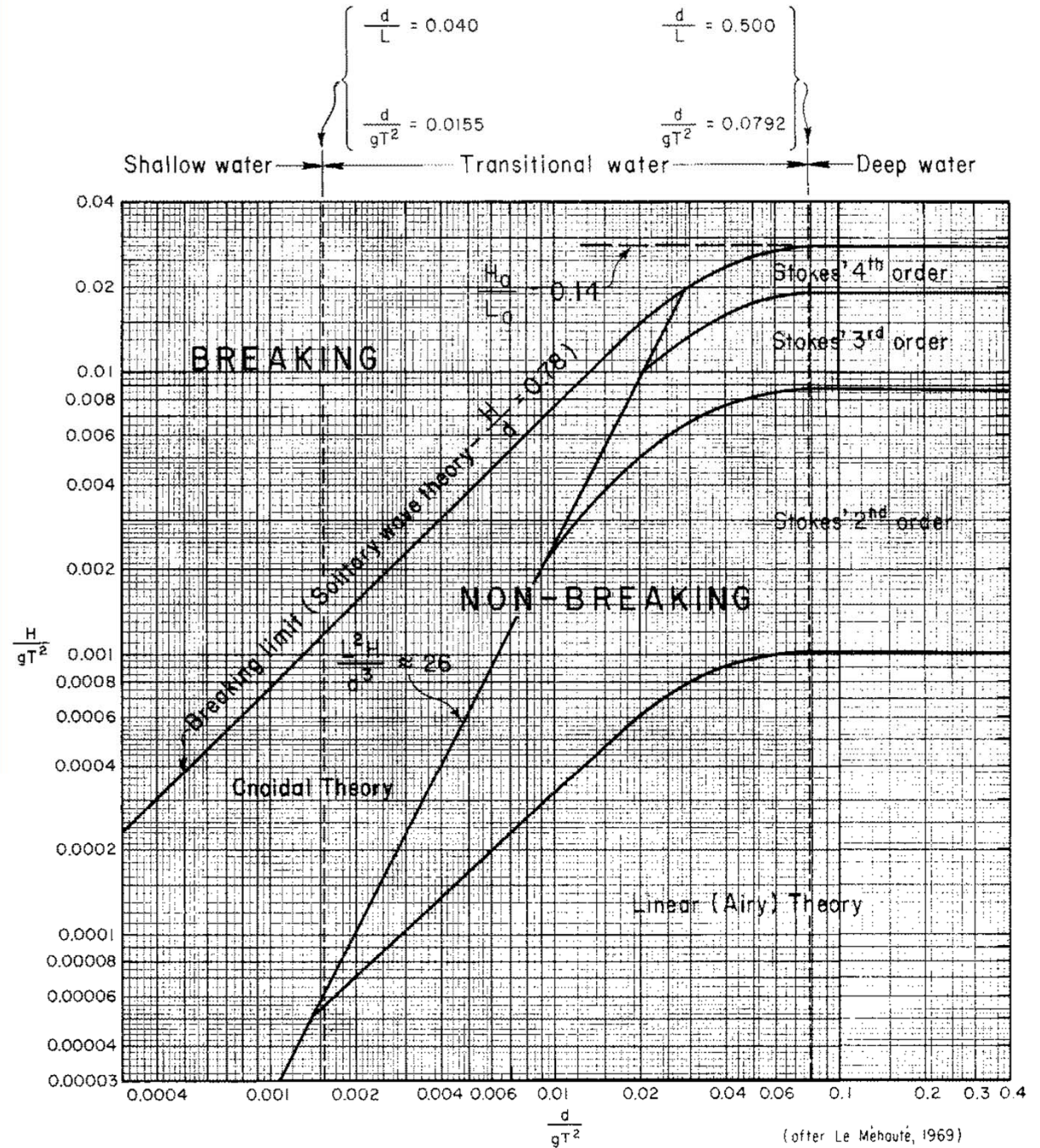
Il calcolo della forza totale richiede la conoscenza della velocità orbitale delle particelle.

u può essere calcolata utilizzando la teoria lineare (Stokes primo ordine) o teorie non lineari.

La scelta della teoria più adatta dipende dalle condizioni ambientali in cui lavoreranno i pali.

PALI

Onde frangenti e regioni
Di validità delle varia teorie



PALI onde non frangenti

Calcolo delle forze

Stokes primo ordine

Assumendo che il palo si trovi nel punto $x=0$ si ha:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$\frac{du}{dt} \approx \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \sin \left(- \frac{2\pi t}{T} \right)$$

E quindi per le forze per unità di lunghezza del palo si ottiene:

$$f_z = C_M \rho g \frac{\pi D^2}{4} H \left\{ \frac{\pi}{L} \frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \right\} \sin \left(- \frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$f_D = C_D \frac{1}{2} \rho g D H^2 \left\{ \frac{gT^2}{4L^2} \left(\frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \right)^2 \right\} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

PALI onde non frangenti

Calcolo delle forze

Stokes primo ordine

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$f_z = C_M \rho g \frac{\pi D^2}{4} H \left\{ \frac{\pi}{L} \frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \right\} \sin \left(- \frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$f_D = C_D \frac{1}{2} \rho g D H^2 \left\{ \frac{gT^2}{4L^2} \left(\frac{\cosh [2\pi (z + d)/L]}{\cosh [2\pi d/L]} \right)^2 \right\} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

Variazione nel tempo

- La forza di drag assume valore massimo quando passa la cresta dell'onda. La forza di inerzia assume il suo valore massimo T/4 secondi prima del passaggio della cresta dell'onda.

Variazione lungo la verticale

- Le forze assumono valore massimo per z=0 e decrescono con la profondità.
- Tuttavia la forza di drag diminuisce con la profondità più rapidamente poiché il coseno iperbolico appare al quadrato.

Limiti della teoria lineare

Con riferimento alla ripidità delle onde di progetto, di solito la teoria lineare non è applicabile.

PALI onde non frangenti

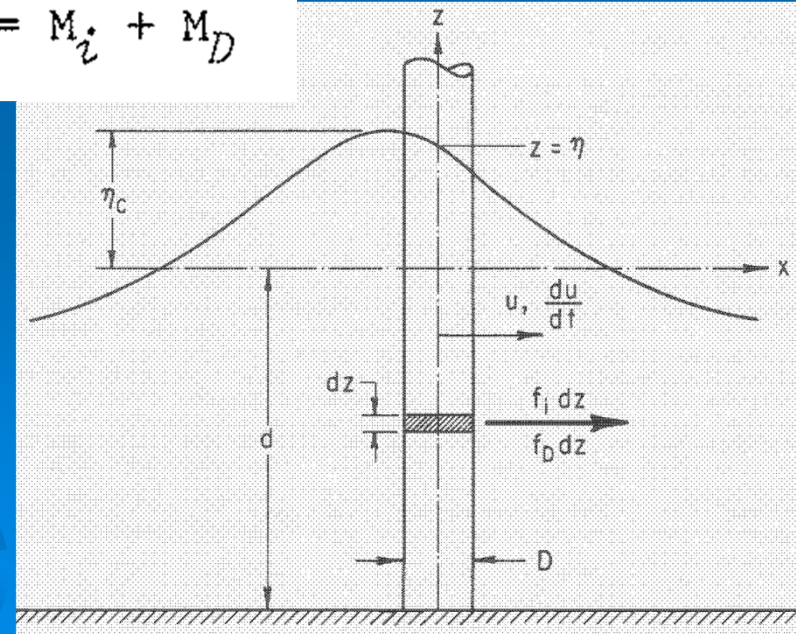
Calcolo dei momenti

Per l'esecuzione di calcoli strutturali spesso non è necessario conoscere la distribuzione esatta delle forze lungo il palo.

La forza orizzontale totale F e il momento totale M calcolato rispetto al fondo $z=-d$ Sono forniti dalle seguenti espressioni di carattere generale:

$$F = \int_{-d}^{\eta} f_i dz + \int_{-d}^{\eta} f_D dz = F_i + F_D$$

$$M = \int_{-d}^{\eta} (z+d) f_i dz + \int_{-d}^{\eta} (z+d) f_D dz = M_i + M_D$$



PALI onde non frangenti

Calcolo forze e momenti

$$F = \int_{-d}^n f_i dz + \int_{-d}^n f_D dz = F_i + F_D$$

$$M = \int_{-d}^n (z+d) f_i dz + \int_{-d}^n (z+d) f_D dz = M_i + M_D$$

In generale F e M possono essere scritte nella seguente forma:

$$F_i = C_M \rho g \frac{\pi D^2}{4} H K_i$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho g D H^2 K_D$$

$$M_i = C_M \rho g \frac{\pi D^2}{4} H K_i d S_i = F_i d S_i$$

$$M_D = C_D \frac{1}{2} \rho g D H^2 K_D d S_D = F_D d S_D$$

Dove C_M e C_D sono stati assunti costanti e K_i , K_D , S_i , S_D sono adimensionali.

PALI onde non frangenti

Calcolo forze e momenti (Stokes primo ordine)

SE SI USA LA TEORIA DI STOKES AL PRIMO ORDINE GLI INTEGRALI LUNGO Z POSSONO ESSERE SVILUPPATI ANALITICAMENTE TRA $Z=0$ E $Z=-d$ ottenendo:

$$K_i = \frac{1}{2} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \sin \left(-\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$K_D = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh [4\pi d/L]} \right) \left| \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right| \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$= \frac{1}{4} n \left| \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right| \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

$$S_i = 1 + \frac{1 - \cosh [2\pi d/L]}{(2\pi d/L) \sinh [2\pi d/L]}$$

$$S_D = \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} \left(\frac{1}{2} + \frac{1 - \cosh [4\pi d/L]}{(4\pi d/L) \sinh [4\pi d/L]} \right)$$

I VALORI MASSIMI DELLE FORZE E DEI MOMENTI SI OTTENGONO PER GLI Istanti DI TEMPO CHE RENDONO MASSIMI K_i E K_D .

PALI onde non frangenti

Calcolo forze e momenti massimi

Utilizzando teorie non lineari quali ad esempio:

- Stokes di ordine superiore per condizioni di acqua profonda. Adatte per applicazioni OFFSHORE;
- La teoria delle funzioni di corrente di Dean 1974 (Dean's stream function theory) per onde in acqua bassa. Adatta per applicazioni costiere;

si ottengono le espressioni delle forze e dei momenti da applicare nei casi specifici.

In generale per le forze ed i momenti massimi si ottengono espressioni del tipo:



PALI onde non frangenti

Calcolo forze e momenti massimi

In generale per le forze ed i momenti massimi si ottengono espressioni del tipo:

$$F_m = \phi_m w C_D H^2 D$$

$$M_m = \alpha_m w C_D H^2 D d$$

Si noti che sia le forze che i momenti dipendono dal quadrato dell'altezza d'onda di progetto.

PER H E' NECESSARIO SCEGLIERE H_{MAX} DELLO STATO DI MARE DI PROGETTO POICHE' SI TRATTA DI STRUTTURE A COMPORTAMENTO A ROTTURA DI TIPO FRAGILE

PALI onde non frangenti

Forze trasversali dovute ai vortici di scia (forze di lift)

Il distacco di vortici alternati lungo la scia generata dall'interazione onda-palo da luogo a forze che agiscono sul piano ortogonale rispetto a quello definito dall'asse verticale del palo e dalla direzione di propagazione delle onde.

Queste forze sono dette di "lift" in analogia alle applicazioni areodinamiche (esempio ali degli aerei) ma in questo caso non sono di sollevamento.

Le forze di lift dipendono dalla risposta dinamica della struttura.

Per strutture caratterizzate da una frequenza naturale pari al doppio della frequenza delle onde, si può verificare un accoppiamento dinamico tra le oscillazioni della struttura e il moto alternato dei vortici. Ciò dà origine a forze di lift molto elevate.

PALI onde non frangenti

Forze trasversali dovute ai vortici di scia (forze di lift)

Per strutture molto rigide si può assumere che la forza di drag rappresenti il limite superiore che queste forze trasversali possono raggiungere.



PALI onde non frangenti

Coefficienti idrodinamici delle forze C_D e C_M

I coefficienti C_D e C_M devono essere scelti in relazione alla teoria che viene utilizzata per il calcolo delle forze.

In generale dipendono dal numero di Reynolds

$$Re = u D / \nu$$

u = velocità orbitale delle particelle idriche;

D = diametro del palo;

ν = viscosità cinematica dell'acqua di mare



PALI onde non frangenti

Coefficienti di sicurezza sulle forze

A causa dell'incertezza nella determinazione dei coefficienti C_D e C_M in genere si introducono dei coefficienti di sicurezza sulle forze.

Quando l'onda di progetto ha una limitata probabilità di verificarsi, si può applicare un coefficiente di sicurezza sulla forza pari ad 1,5.

Quando l'onda di progetto ha una elevata probabilità di verificarsi (altezza d'onda limitata dalla profondità del fondale per frangimento) di solito si applica un coefficiente di sicurezza maggiore pari almeno a 2,0.

Oltre al coefficiente di sicurezza si deve tener conto di eventuali cambiamenti che si possono verificare durante la vita economica del palo come ad esempio fenomeni di scavo alla base e la variazione di scabrezza causata dalla formazione di molluschi ed alghe che aumentano la massa idrosinamica aggiunta del palo.

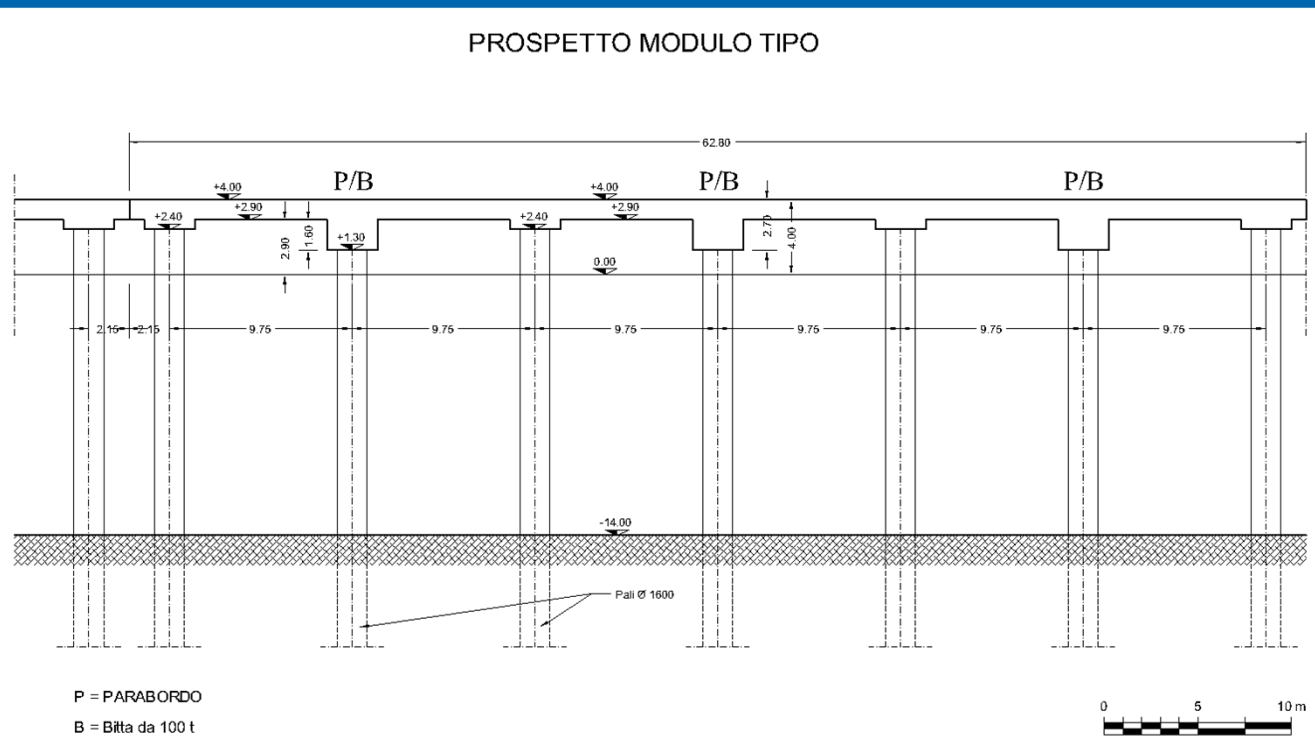
PALI onde non frangenti

Gruppi di pali (palificate)

Finora abbiamo trattato il caso di palo singolo.

Nel caso molto frequente in cui il palo è collegato strutturalmente ad altri pali da un impalcato o un trasverso con vincoli assimilabili ad un incastro, come ad esempio per i pontili, per le briccole di ormeggio o per le strutture offshore, il calcolo strutturale richiede la determinazione delle condizioni di carico più gravose sull'intera

S



PALI onde non frangenti

Gruppi di pali (palificate)

In questi casi occorre tenere presente che le forze variano nello spazio e nel tempo con la stessa periodicità delle onde.

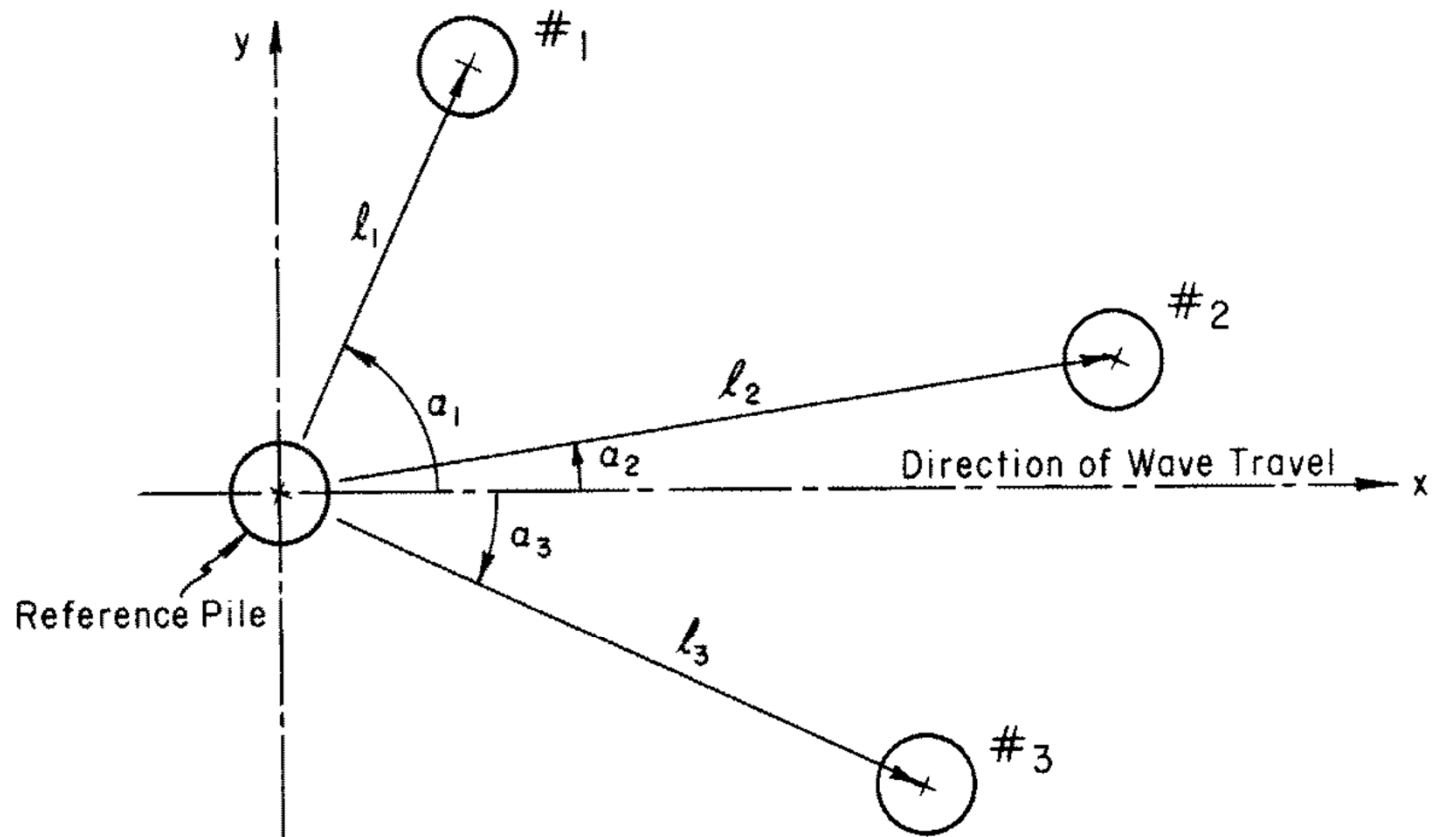


Figure 7-86. Definition sketch: calculation of wave forces on a group of piles that are structurally connected.

PALI onde non frangenti

Gruppi di pali (palificate)

In questi casi occorre tenere presente che le forze variano nello spazio e nel tempo con la stessa periodicità delle onde.

In tal caso bisogna tenere conto della fase dell'onda:

$$\Theta = 2\pi x / L - 2\pi t / T$$

dove:

$$x = l_n \cos \alpha_n$$

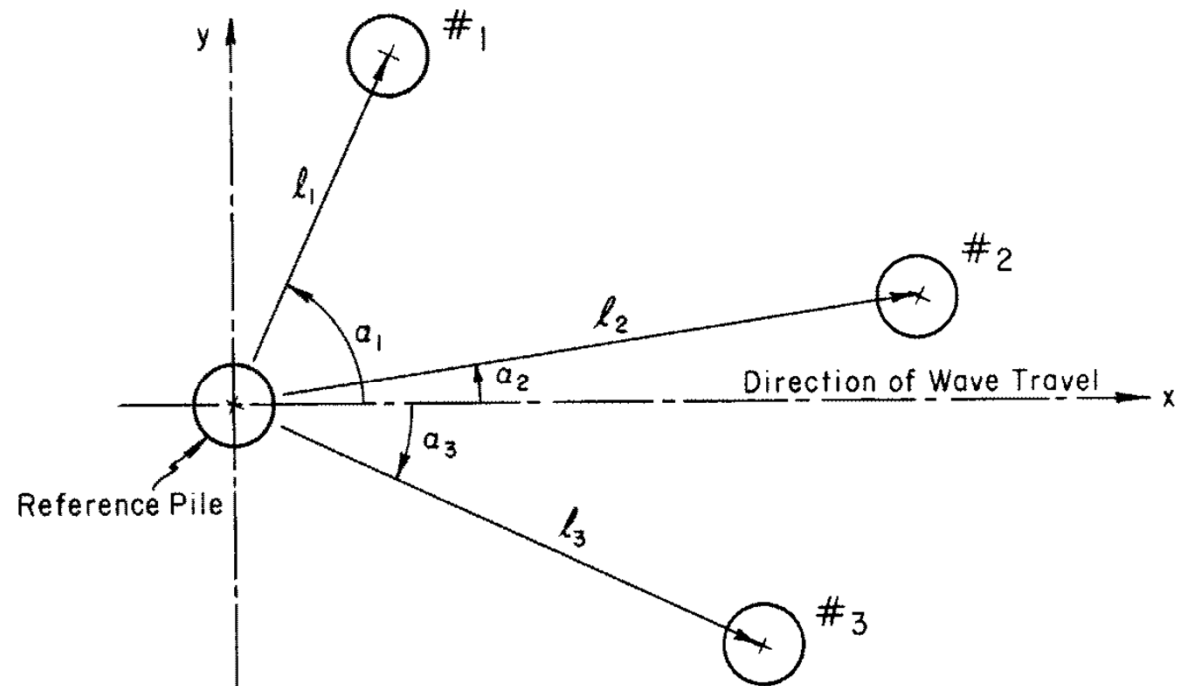


Figure 7-86. Definition sketch: calculation of wave forces on a group of piles that are structurally connected.

PALI onde non frangenti

Gruppi di pali (palificate)

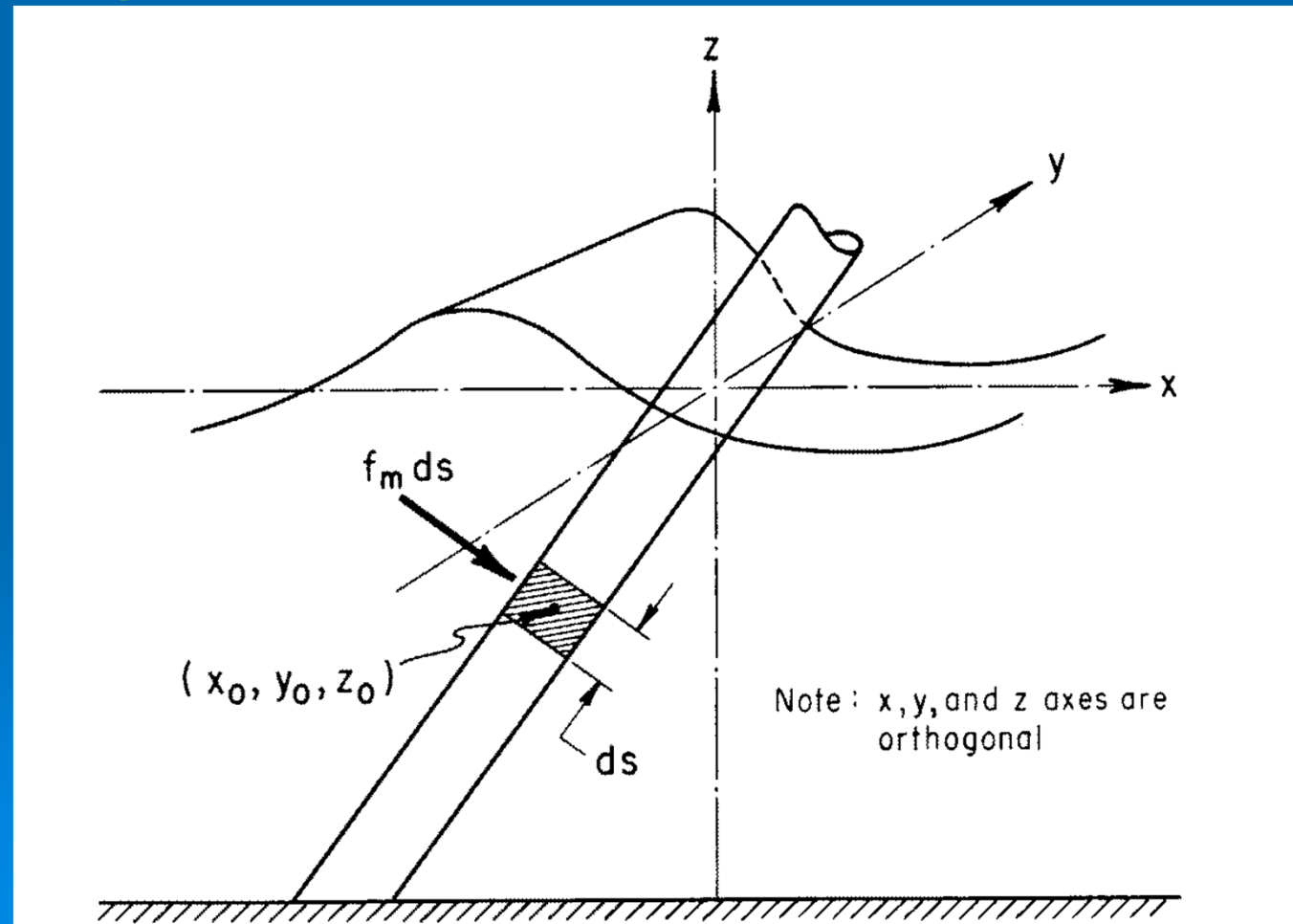
Si può assumere che i pali non siano influenzati dai pali vicini quando la distanza è superiore a $3D$.



PALI onde non frangenti

Pali inclinati

Nel caso di pali inclinati le forze devono essere calcolate utilizzando le componenti della velocità e delle accelerazioni nella direzione perpendicolare al palo.

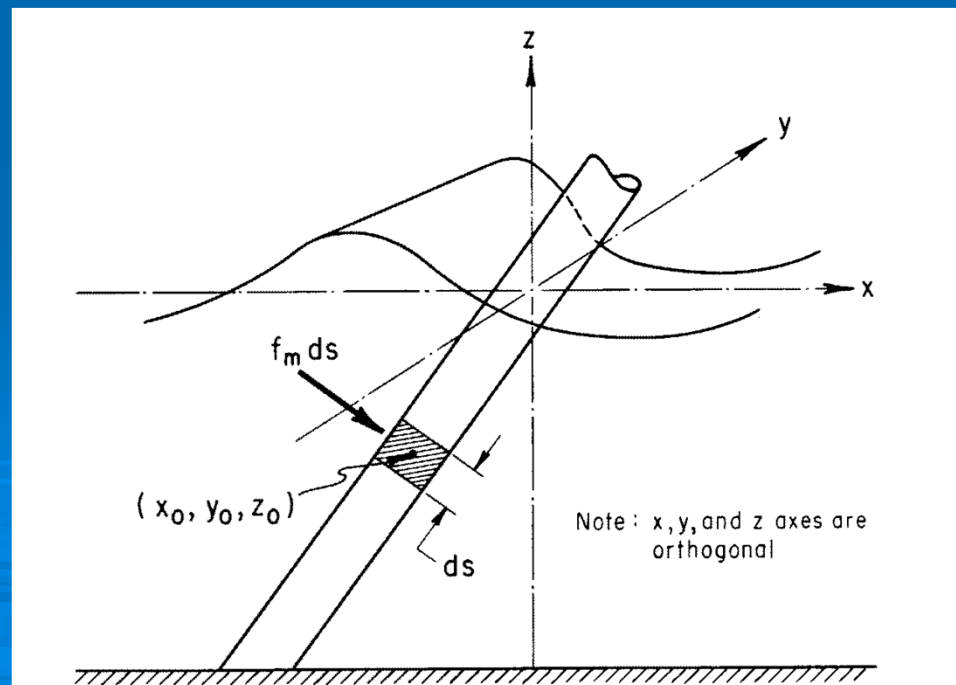


PALI onde non frangenti

Pali inclinati

Tuttavia si può dimostrare che questo approccio non è conservativo, poiché la forza di drag dipende dalla velocità risultante piuttosto che dalla componente di velocità ortogonale all'asse del palo.

Per ovviare a questo problema si può assumere che per un dato punto x_0, y_0, z_0 la forza per unità di lunghezza del palo è data dalla forza orizzontale per unità di lunghezza di un palo fittizio verticale posto nel medesimo punto.



PALI onde non frangenti

Frangimento

Nel caso di frangimento in acqua bassa la forza di inerzia è piccola rispetto alla forza di drag. Pertanto si applica solo la forza di drag.

Le forze che si ottengono di solito risultano maggiori rispetto a quelle che si hanno in assenza di frangimento.

L'espressione generale della forza massima è:

$$F_m = \frac{1}{2} C_D \rho g D H_b^2$$

$$C_D = 1,75$$

Essendo $u_{\text{cresta}} = \sqrt{g d_b} = \sqrt{g H_b}$ si ottiene:

$$F_m = \frac{1}{2} C_D \rho g D u_{\text{cresta}}^2 = 0.88 \rho g H_b$$