

Gianni Michele De Gaetanis

PUSHOVER

DALLA TEORIA ALLA PRATICA

**APPROCCIO NORMATIVO, BASI TEORICHE, IMPLEMENTAZIONI
DEL METODO PUSHOVER, CURVE DI CAPACITÀ, CARATTERISTICHE
DEI MATERIALI, ELEMENTI STRUTTURALI**

SECONDO LE NTC, SUCCESSIVE MODIFICHE E INTEGRAZIONI
E CIRCOLARI ESPLICATIVE



SOFTWARE INCLUSO

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),
Test iniziale (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)




GRAFILL

Gianni Michele De Gaetanis

PUSHOVER – DALLA TEORIA ALLA PRATICA

ISBN 13 978-88-8207-739-6

EAN 9 788882 077396

Manuali, 167

Prima edizione, aprile 2015

De Gaetanis, Gianni Michele <1970-> Pushover : dalla teoria alla pratica / Gianni Michele De Gaetanis. – Palermo : Grafill, 2015. (Manuali ; 167) ISBN 978-88-8207-739-6 1. Strutture – Calcolo. 624.17 CDD-22 SBN Pal0277851 CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in versione eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.
Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal.
Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di aprile 2015

presso **Tipolitografia Luxograph S.r.l.** Piazza Bartolomeo Da Messina, 2/e – 90142 Palermo

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'autore dedica questa pubblicazione
ai suoi cari

PREFAZIONE	p	1	Indice
INDICE ANALITICO	"	3	
ELENCO DEI SIMBOLI	"	5	
ANALISI SISMICA:			
L'APPROCCIO NORMATIVO DELLE NTC	"	9	
Generalità sull'analisi sismica e nozioni preliminari.....	"	11	
Analisi lineare statica.....	"	13	
Analisi lineare dinamica.....	"	15	
Nota teorica: dinamica di un oscillatore.....	"	15	
Sistema 1GDL.....	"	15	
Sistema 2GDL.....	"	21	
Sistema nGDL.....	"	23	
Metodo secondo norma.....	"	32	
Analisi non lineare statica (pushover).....	"	34	
Analisi non lineare dinamica.....	"	35	
Criterio di utilizzo dei vari tipi di analisi.....	"	36	
Caratteristiche dei materiali e delle costruzioni.....	"	37	
Regolarità.....	"	37	
Regolarità in pianta.....	"	37	
Regolarità in altezza.....	"	38	
Duttilità.....	"	39	
Duttilità del materiale.....	"	40	
Duttilità locale.....	"	42	
Duttilità strutturale.....	"	45	
Riferimenti normativi e bibliografici.....	"	49	
ANALISI NON LINEARE STATICA:			
BASI TEORICHE DEL METODO PUSHOVER	"	51	
Introduzione.....	"	53	
Fondamenti teorici e obiettivi dell'analisi pushover.....	"	58	
Basi dell'analisi.....	"	59	
Equazioni del moto.....	"	59	
Analisi a profilo di spostamenti imposto.....	"	60	
Analisi a profilo di forze imposto.....	"	62	
Conversione nGDI-1GDL.....	"	63	
Curva di capacità e linearizzazioni.....	"	66	
Curva di capacità.....	"	66	
Linearizzazione della curva di capacità.....	"	68	
Approccio delle NTC.....	"	70	
Riferimenti normativi e bibliografici.....	"	74	

APPLICAZIONE DEL METODO PUSHOVER	p.	75
Introduzione	"	77
Profili di carico.....	"	77
Tipologie	"	77
Profili invarianti.....	"	77
Approccio normativo	"	79
Metodi dell'analisi pushover	"	81
Inquadramento del problema	"	81
Implementazione del metodo.....	"	81
Metodo CSM	"	83
Riferimenti normativi e bibliografici	"	88
CARATTERISTICHE DELLE STRUTTURE: CENNI	"	89
Introduzione	"	91
Strutture di calcestruzzo: modellazione	"	91
Materiali e sezioni	"	91
Calcestruzzo	"	91
Acciaio	"	92
Sezioni	"	92
Elementi strutturali	"	93
Orizzontamenti rigidi e/o flessibili	"	94
Nodi	"	95
Travi e pilastri	"	95
Pareti	"	96
Riferimenti normativi e bibliografici	"	97
ESEMPI APPLICATIVI	"	99
Premessa	"	101
Esempio 1		
Determinazione dei profili di carico per l'analisi pushover	"	101
Esempio 2		
Costruzione della curva bilineare di una curva di capacità 1GDL incrudente hardening	"	104
Esempio 3		
Costruzione della curva bilineare di una curva di capacità 1GDL incrudente softening	"	108
Esempio 4		
Costruzione della curva bilineare di una curva di capacità nGDL secondo le NTC	"	112
Esempio 5		
Costruzione dello spettro di domanda nel piano ADRS	"	117

INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO	"	121
Note sul software incluso.....	"	123
Requisiti hardware e software	"	123
Download del software e richiesta della password di attivazione	"	123
Installazione ed attivazione del software	"	123

Il metodo pushover viene proposto quale il criterio risolutivo di ogni problema, sia in termini di verifica di strutture esistenti, sia in termini di progettazione ex novo.

Se da un lato è vero che il metodo è in grado di indagare sul comportamento strutturale in condizioni post-elastiche, altresì, il metodo si basa su ipotesi non del tutto verificate le quali, secondo gli esperti del settore, consentono comunque previsioni attendibili: è ovvio che per un ingegnere tale posizione non può essere accettabile.

Infatti, non risulta ragionevole ritenere che, sulla base di ipotesi non del tutto verificate, non costanti durante l'evoluzione temporale dell'evento sismico, i risultati siano ragionevolmente descrittivi della evoluzione del comportamento strutturale.

L'analisi pushover, nel complesso, si presenta molto articolata e richiede un impegno computazionale importante: è necessario ricorrere ad un software per poter affrontare e risolvere i problemi.

Tuttavia, se ci si rivolge al mondo del software si scopre come i diversi prodotti in commercio sono, sostanzialmente, concordanti in campo elastico ma, in campo plastico, evidenziano importanti differenze, in alcuni casi notevoli.

Lo studio condotto nel testo ha quale obiettivo inquadrare il problema dal punto di vista fisico-matematico e fornire le informazioni grazie alle quali il progettista possa essere guidato nella progettazione e nella valutazione dei risultati del calcolo.

Una tale valutazione è possibile, ovviamente, solo conoscendo adeguatamente le procedure di calcolo e maturando una adeguata sensibilità nell'analisi dei dati numerici.

Aprile 2015

	Indice analitico
A	
Acciaio	p. 92
Analisi a profilo di forze imposto	" 62
Analisi a profilo di spostamenti imposto	" 60
Analisi lineare dinamica	" 15
Analisi lineare statica	" 13
Analisi non lineare dinamica	" 35
Analisi non lineare statica (pushover).....	" 34
C	
Calcestruzzo	" 91
Conversione nGDI-1GDL	" 63
Curva di capacità	" 66
D	
Duttilità del materiale	" 40
Duttilità locale	" 42
Duttilità strutturale	" 45
Duttilità	" 39
E	
Elementi strutturali	" 93
M	
Materiali	" 91
Metodo CSM	" 83
N	
Nodi	" 95
O	
Orizzontamenti rigidi e/o flessibili	" 94
P	
Pareti	" 96
R	
Regolarità in altezza	" 38
Regolarità in pianta	" 37
Regolarità	" 37
S	
Sezioni	" 92
Sistema 1GDL	" 15
Sistema 2GDL	" 21
Sistema nGDL	" 23
Strutture di calcestruzzo: modellazione	" 91
T	
Travi e pilastri	" 95

$\{\Phi\}$	Vettore delle forme modali
δ	Fattore per valutazione degli effetti torsionali accidentali
λ	Aliquota di massa partecipante
μ	Duttilità
μ_c	Duttilità in curvatura
ω	Pulsazione naturale
ξ	Smorzamento relativo a quello critico
χ_u	Curvatura di una sezione
χ_u	Curvatura ultima
χ_s	Curvatura di snervamento
χ_f	Curvatura di prima fessurazione
A	Costante
a	Accelerazione
a(t)	Accelerazione in funzione del tempo t
a _m	Accelerazione della massa m
a _{terr} (t)	Accelerazione del terreno in funzione del tempo t
B	Costante
c	Viscosità
c ₁	Viscosità asta 1
C ₁	Fattore di calcolo di T ₁ Costante di calcolo
c ₂	Viscosità asta 2
C ₂	Costante di calcolo
d	Deformazione Spostamento
d _e	Deformazione elastica al limite dello snervamento
d _{el}	Deformazione elastica a rottura
d _u	Deformazione ultima a rottura
E	Combinazione probabilistica dei modi di vibrare

**Elenco
dei simboli**

F	Forza
F	Forza
F_1	Forza associata alla massa 1
F_{11}	Forza associata alla massa 1 e dovuta allo spostamento $x_1(t)$
F_{12}	Forza associata alla massa 1 e dovuta allo spostamento $x_2(t)$
F_2	Forza associata alla massa 2
F_{21}	Forza associata alla massa 2 e dovuta allo spostamento $x_1(t)$
F_{22}	Forza associata alla massa 2 e dovuta allo spostamento $x_2(t)$
F_c	Forza dissipativa viscosa
F_e	Forza elastica al limite dello snervamento
F_{el}	Forza elastica a rottura
F_i	Forza statica equivalente applicata alla massa i -esima Generica forza i -esima
F_{in}	Forza di inerzia
F_k	Forza elastica di richiamo
F_{max}	Forza massima
g	Accelerazione di gravità Coefficiente di partecipazione
H	Altezza di una costruzione dal piano di fondazione
k	Rigidezza
k_1	Rigidezza asta 1
k_2	Rigidezza asta 2
L_e	Distanza tra due elementi resistenti più lontani, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata
m	Massa
M	Momento
m_1	Massa 1
m_2	Massa 2
M_f	Momento di prima fessurazione
M_s	Momento di snervamento

M_u	Momento ultimo
p	Esponente
P_0	Costante di calcolo di una forzante
q	Fattore di struttura
$S_d(T_1)$	Ordinata dello spettro di risposta di progetto corrispondente al periodo T_1
t	Tempo
T_1	Periodo del modo principale di vibrare nella direzione considerata
T_b	Taglio alla base
T_C	Periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante
T_D	Periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante
v_0	Velocità iniziale
W_i	Massa del piano i-esimo
x	La distanza dell'elemento resistente verticale dal baricentro geometrico di piano misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata
$x(t)$	Spostamento funzione del tempo t
x_0	Spostamento iniziale
$x_0(t)$	Posizione della base al tempo t
$x_1(t)$	Spostamento della massa 1 funzione del tempo t
$x_2(t)$	Spostamento della massa 2 funzione del tempo t
$x_m(t)$	Spostamento della massa m al tempo t
z_i, z_j	Quota del piano i-esimo, j-esimo

**ANALISI SISMICA:
L'APPROCCIO NORMATIVO
DELLE NTC**

L'assetto normativo vigente si presenta abbastanza dettagliato e preciso: in buona sostanza, l'approccio tecnico è particolareggiato ed esauriente anche se, in talune situazioni e nel trattamento di alcune specifiche questioni tecniche, si riscontrano disarmanti silenzi.

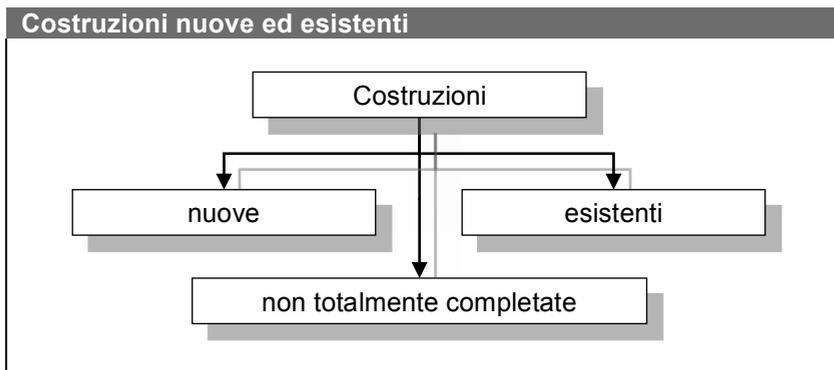
Per approcciarsi allo studio dell'analisi sismica è necessario effettuare una precisazione fra strutture esistenti e nuove strutture: le NTC trattano, in relazione all'analisi sismica, le strutture nuove in modo separato da quelle esistenti anche se si legge *“Per quanto non diversamente specificato nel presente capitolo (Ndr Cap. 8), le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono il riferimento anche per le costruzioni esistenti”* [1].

Quindi, in generale, se non diversamente esplicitato, le disposizioni generali di analisi sismica definite per le nuove costruzioni sono applicabili anche alle strutture esistenti.

Il senso comune suggerisce, intuitivamente, la differenza fra costruzione esistente e nuova: la norma, tuttavia, pone dei limiti ben precisi sulle due nozioni che, spesso, sono in contrasto con quello che potrebbe essere un concetto acquisito o maturato per esperienza.

In aggiunta, la norma delinea una categoria intermedia fra le costruzioni esistenti e le nuove: le costruzioni non totalmente completate.

Il contesto normativo, quindi, può essere riassunto come di seguito illustrato:



In dettaglio, si possono considerare le seguenti nozioni, in parte contenute nelle NTC e in parte nella Circolare:

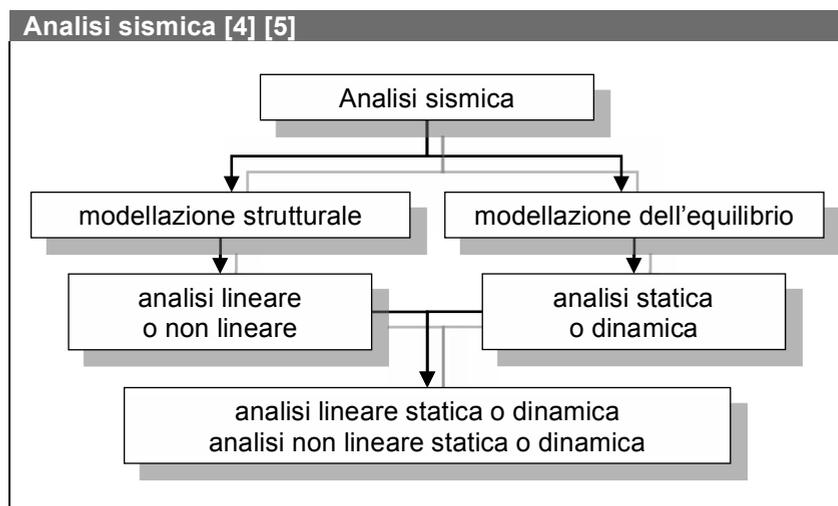
- costruzione nuova; le NTC non danno una definizione ma è immediato considerare come tale la costruzione che non esiste, della quale non è stato realizzato alcun elemento;
- non totalmente completata o non completamente realizzata; la nozione richiede una specificazione in relazione al tipo di struttura e la definizione, fornita dalla Circolare, differenzia fra struttura di c.a. e acciaio e struttura di muratura; ossia [2]:
 - *“per costruzione di c.a. e di acciaio con struttura completamente realizzata si intende quella per cui, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, sia*

stata redatta la relazione a struttura ultimata ai sensi dell'art. 65 del D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380" [2];

- "per edifici in muratura con struttura completamente realizzata si intende quella per cui, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, sia stato redatto il certificato di collaudo statico ai sensi del Cap.4 del D.M. 20 novembre 1987 o ai sensi delle NTC" [2];
- costruzione esistente; le NTC ne definiscono il concetto e precisamente "È definita costruzione esistente quella che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, la struttura completamente realizzata" [3].

Introdotta il concetto di costruzione, è possibile approcciarsi ai metodi di analisi sismica.

I metodi espressamente previsti dalla norma sono quattro, derivanti dalle combinazioni fra la modellazione strutturale (analisi lineare e non lineare) e la modellazione dell'equilibrio della struttura (analisi statica e dinamica). Ossia [4] [5]:



Sia l'approccio (modellazione) strutturale che l'approccio (modellazione) all'equilibrio sono condizionati da quelli che la norma indica quali sistemi dissipativi o non dissipativi.

Il termine "sistemi dissipativi" può indicare, secondo le NTC, sia un dispositivo dissipativo che una caratteristica strutturale.

Un dispositivo dissipativo, cioè un meccanismo applicato alla struttura atto a svolgere la specifica funzione di dissipare energia, può essere attivo, semi-attivo o passivo in ragione del comportamento.

La capacità dissipativa strutturale, invece, è legata alla duttilità: quest'ultima può essere alta o bassa (CD"A" oppure CD"B") in funzione della entità delle plasticizzazioni che si possono instaurare [6].

Occorre precisare che la modellazione strutturale lineare o non lineare, di fatto, è in relazione al comportamento meccanico dei materiali: una struttura costituita da materiali lineari è a comportamento lineare mentre una struttura costituita da materiali non lineari è a comportamento non lineare.

Il metodo si basa sulla applicazione di un sistema di forze statiche calcolate in modo da essere equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica [7].

Analisi lineare statica

L'analisi lineare statica è, sostanzialmente, un'approssimazione dell'analisi lineare dinamica e si basa su alcune ipotesi fondamentali:

- la struttura è a comportamento lineare con spostamenti linearmemente crescenti con l'altezza (a partire dalle fondazioni) [7] spostando, di fatto, la descrizione della non linearità geometrica sul fattore di struttura q [8];
- gli effetti taglianti relativi al primo modo di vibrare, di periodo indicato con T_1 , valutato in prima approssimazione come di seguito indicato [9], devono essere predominanti sugli effetti degli altri modi [7];
- gli effetti dell'azione sismica sono calcolati solo per il modo di vibrare con periodo T_1 escludendo qualunque combinazione di effetti [9];
- masse di piano concentrate negli orizzontamenti;
- assegnazione al modo di vibrare di una aliquota di massa partecipante (λ) [9].

Quindi, sia per sistemi dissipativi che per sistemi non dissipativi [8], l'applicazione del metodo è ammessa a condizione che siano rispettati i seguenti requisiti [7]:

- costruzioni regolari in altezza;
- $T_1 \leq 2.50T_C$ o $T_1 \leq T_D$.

In merito alle ipotesi di applicazione del metodo, secondo quanto prescritto dalle NTC, è necessaria una precisazione: nel testo della norma si legge "...il periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame (T_1) non superi $2,5 T_C$ o T_D e che la costruzione sia regolare in altezza" [7].

Il periodo precedente è un piccolo pasticcio in quanto non è chiaro cosa bisogna fare con il periodo T_D : T_D deve essere riguardato quale un limite di T_1 in alternativa a $2,5 T_C$ o contemporaneo?

Ossia, T_1 deve essere contemporaneamente inferiore a $2,5 T_C$ e T_D , sintetizzando con la scrittura $T_1 \leq \min\{2.50T_C; T_D\}$, oppure è sufficiente che una solo di tali condizioni sia verificata? La norma non chiarisce il dubbio.

Poiché il modo di vibrare, ed il relativo periodo dipendono dalla distribuzione di masse e rigidezze, le NTC, per costruzioni civili o industriali di altezza non superiore ai 40 m e massa approssimativamente uniformemente distribuita lungo l'altezza stessa, consentono il calcolo del periodo del modo di vibrare principale (T_1) nella dire-

zione in esame, salvo calcolazioni più accurate, utilizzando la formula seguente [7]:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{\frac{3}{4}}$$

essendo H l'altezza della costruzione, in metri, dal piano di fondazione, e C1 valutato secondo la seguente tabella [7]:

Fattore C ₁ [7]	
Tipo di costruzione	Fattore C ₁
Costruzione con struttura a telaio di acciaio	0.085
Costruzione con struttura a telaio di calcestruzzo	0.075
In tutti gli altri casi (ossia esclusi i precedenti)	0.050

Le forze statiche equivalenti, F_i, da applicare al baricentro della massa i-esima (massa di piano), sono calcolabili in relazione all'ordinata dello spettro di progetto corrispondente al periodo T₁ e la loro distribuzione sulla struttura segue la forma (valutata approssimativamente) del modo di vibrare principale nella direzione in esame [7]:

$$F_i = \frac{\lambda S_d(T_1) \sum_{j=1}^N W_j}{\underbrace{g}_{F_w}} \frac{z_i W_i}{\sum_{j=1}^N z_j W_j} = F_w \frac{z_i W_i}{\sum_{j=1}^N z_j W_j}$$

potendosi trarre λ dal seguente prospetto [7]:

Fattore λ [7]	
Caratteristiche costruzione	Fattore λ
costruzioni con almeno tre orizzontamenti e T ₁ ≤ 2T _C	0.85
in tutti gli altri casi	1.00

Al fine di una semplificazione nei calcoli, nello studio delle costruzioni e degli edifici, se le rigidzze laterali e le masse sono distribuite simmetricamente in pianta, la norma consente la valutazione degli effetti torsionali accidentali, valutati a partire dalle sollecitazioni F_i su ogni elemento resistente, applicando un fattore δ [7]:

$$\delta = 1 + \frac{0.60 \cdot x}{L_e}$$

essendo [7]:

- x è la distanza dell'elemento resistente verticale dal baricentro geometrico di piano, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata;
- L_e è la distanza tra i due elementi resistenti più lontani, misurata allo stesso modo.

Resta inteso che se una struttura dipende significativamente dai modi di vibrare superiori, pur essendo regolare in altezza, l'analisi statica non può essere utilizzata [10].

L'analisi lineare dinamica, o analisi modale, consta della soluzione delle equazioni del moto della costruzione la quale è [11]:

- considerata elastica;
- in condizioni di oscillazioni libere, ossia in assenza di forzante esterna;
- descritta da particolari configurazioni deformate costituenti i modi naturali di vibrare di una costruzione.

Prima di procedere, si considera una nota teorica sulla dinamica di un oscillatore.

Lo studio di un oscillatore, condotto attraverso una specifica modellazione strutturale, può esser fatto in tre modi [12]:

- tramite le equazioni dell'equilibrio dinamico (d'Alembert);
- tramite le equazioni di conservazione dell'energia totale (Hamilton);
- tramite il metodo degli elementi finiti.

Il metodo più semplice e diffuso si basa sul principio di d'Alembert [12]: il principio, che discende da quello dei lavori virtuali, afferma che il moto, in ogni istante, può essere riguardato staticamente a condizione di introdurre le forze di inerzia.

L'obiettivo dell'analisi è quello di studiare le oscillazioni forzate di un sistema dissipativo [13]. Si considera dapprima un sistema ad un grado di libertà.

Si studi un dato sistema fisico schematizzabile attraverso una massa collegata estremità di un'asta: si può considerare lo schema di seguito riportato e l'equivalente meccanico di studio.

Analisi lineare dinamica

*Nota teorica:
dinamica di un oscillatore*

Sistema
1GDL